
GEOGRAFICKÝ ČASOPIS

51

1999

2

*Jaroslav Hofierka, * Marcel Šúri***

MODELY VODNEJ ERÓZIE PÔDY A ICH APLIKÁCIE NA SLOVENSKU

J. Hofierka, M. Šúri: Water erosion models and their applications in Slovakia. Geografický časopis, 51, 2, 1999, 64 refs.

The paper brings an overview of the state-of-the-art in soil water erosion modelling with a focus on physically-based models and models implemented in or linked with geographic information systems. Characteristics of empirical and physically-based erosion models are considered as well as data sources used for deriving input parameters (maps, field measurements and mapping, remote sensing). Special attention is given to erosion modelling activities in Slovakia.

Key words: soil water erosion models, geographic information system

I ÚVOD

Pod pojmom *vodná (zrážková) erózia pôdy* možno rozumieť v zmysle práce Lehotského a Stankovianskeho (1992) súbor erózne-akumulačných procesov podmienených zrážkovou vodou (dažďovou a z roztopeného snehu) tečúcou po svahu. Voda tečúca po svahu (povrchový tok vody) spôsobuje oddelenie pôdnych častíc, ich transport a nakoniec aj ich uloženie (akumuláciu). Spolu vytvárajú tri základné subprocesy vodnej erózie. Základným nástrojom na modelovanie pohybu pôdnych častíc po svahu je modelovanie povrchového toku vody (Moore a Foster, 1990).

* GeoModel s.r.o., J. Grešáka 22, 085 01 Bardejov

** Geografický ústav SAV, Štefánikova 49, 814 73 Bratislava

Vodná erózia je komplikovaný a dynamický fenomén s výraznou časovou a priestorovou variabilitou. Táto variabilita je podmienená najmä dynamikou povrchového toku vody a faktormi prostredia, v ktorom tieto procesy prebiehajú. Komponenty krajiny, ktoré sa na týchto subprocesoch podieľajú a ich - z hľadiska vodnej erózie - relevantné vlastnosti sú opísané napr. v práci Minára a Hofierku (1992).

Cieľom príspevku je poskytnúť prehľad o súčasnom stave erózneho modelovania so zameraním na fyzikálne modely a modely implementované v prostredí geografických informačných systémov. Pozornosť je venovaná vstupným parametrom modelov, ako aj údajovým zdrojom, ktoré možno použiť na ich odvodenie. V závere sú zhrnuté naše poznatky o aktivitách v oblasti erózneho modelovania na Slovensku.

2 MODEL Y VODNEJ ERÓZIE PÔDY

Cieľom modelov vodnej erózie pôdy je simulovať procesy povrchového plošného a líniového toku vody v povodí, uvoľňovania, transportu a akumulácie pôdných častíc s možnosťou predikovať následky a poskytnúť podklady pre hodnotenie alternatívnych ochranných opatrení. Niektoré staršie *empirické modely* (napr. USLE) nepopisujú tieto čiastkové procesy, ale sústreďujú sa na predikciu celkového výsledného efektu - odnosu pôdy zo skúmanej plochy. *Fyzikálne modely* (napr. WEPP, ERDEP, SIMWE) pri modelovaní erózných procesov explicitne pracujú s povrchovým tokom vody, ako aj čiastkovými procesmi.

V modeloch vodnej erózie sa používa celý rad parametrov, ktoré charakterizujú z hľadiska vodnej erózie relevantné vlastnosti komponentov krajiny. Medzi najdôležitejšie patria:

- *erózny účinok prívalových zrážok, resp. topiaceho sa snehu*, ktoré svojím množstvom, intenzitou, dĺžkou trvania a energiou ovplyvňujú tvorbu povrchového toku vody;
- *pôdne vlastnosti*, ktoré ovplyvňujú náchylnosť pôdy na eróziu a tiež tvorbu povrchového toku vody. Medzi hlavné fyzikálne parametre patria: priepustnosť pôdy, zrnitosťné zloženie, rýchlosť sedimentácie častíc, drsnosť povrchu, obsah pôdnej vody, stabilita agregátov, nasýtená hydraulická vodivosť, kritická hodnota hydraulického tlaku, zamrznutie a pod.;
- *morfometrické charakteristiky reliéfu* (predovšetkým sklon, tvary reliéfu, dĺžka svahov, špecifické prispievajúce plochy), ktoré určujú rýchlosť a smer tečúcej vody;
- *vlastnosti vegetačnej (krajinnej) pokrývky* (živý a neživý materiál) ovplyvňujúce povrchový tok vody tým, že tlmí energiu dažďových kvapiek, zvyšuje infiltráciu vody do pôdy, pričom vplýva aj na ďalšie pôdne vlastnosti, čím priamo alebo sprostredkovaně ovplyvňuje povrchový tok. Patria sem aj *zásahy človeka do krajiny*, ktoré vznik a priebeh erózie môžu akcelerovať, alebo ju tlmieť (agrotechnické, lesohospodárske alebo vodohospodárske opatrenia, štruktúra využitia krajiny).

V práci Mitáša a Mitášovej (1998) sú explicitne definované tri základné podmienky, ktoré by mali moderné erózne modely spĺňať:

1. mali by byť založené na fundamentálnych, fyzikálne definovaných vzťahoch a parametroch s jasne definovanou fyzikálnou interpretáciou, ich závislosť na empirických koncepciách by sa mala minimalizovať,

2. mali by využívať robustné numerické metódy podporujúce modelovanie s vysokým priestorovým rozlíšením,

3. mali by mať plne zapracované všetky aspekty časovej a priestorovej variability relevantných faktorov - zrážok, reliéfu, pôdy, vegetačnej a krajinskej pokrývky.

2.1 Empirické modely

Vývoj v oblasti erózneho modelovania charakterizuje postupný prechod od empirických modelov smerom k fyzikálne orientovaným. Pomocou empirických modelov možno vyjadriť náchylnosť krajiny na potenciálnu a reálnu vodnú eróziu. Ak sa *potenciálna erózia* chápe ako erózia, ku ktorej by došlo za predpokladu, že by priebeh erózne-akumulačných procesov neovplyvňovala vegetačná (krajinná) pokrývka a zásahy človeka, tak *reálna erózia* zahŕňa okrem vplyvu stabilne pôsobiacich prírodných (abiotických) faktorov aj vlastnosti vegetačnej pokrývky a aktivity človeka, zhmotnené v konkrétnych prejavoch využívania krajiny (porovnaj Solín 1994, Linkeš et al. 1997).

Empirické modelovanie erózie pôdy môže mať semikvantitatívny alebo kvantitatívny charakter. V prvom prípade sa výpočty uskutočňujú na báze expertného odhadu vplyvu jednotlivých parametrov, pričom výsledný vplyv je vyjadrený eróznym indexom alebo slovné (pozri napr. Stehlík 1970, Midriak 1977, 1980, Bučko 1980, Bučko a Zachar 1980, Solín a Lehotský 1996, Solín a Cebecauer 1998, Hanušin 1998). V druhom prípade sa výpočet erózie pôdy opiera o empiricky namerané údaje (pozri napr. Wischmeier a Smith 1978, Nearing et al. 1990). Typickým predstaviteľom tohoto prístupu je model predikcie erózneho odnosu *USLE* (Universal Soil Loss Equation, Wischmeier a Smith 1978), ktorý je vyjadrený rovnicou:

$$A = R.K.L.S.C.P, \quad [1]$$

kde A - odnos pôdy ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$), R - faktor eróznej účinnosti dažďa ($MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$), K - faktor náchylnosti pôdy na eróziu, LS - faktor dĺžky a sklonu svahu, C - faktor ochranného vplyvu pokrývnosti pôdy vegetáciou a P - faktor protieróznych opatrení. Tento model a jeho modifikácia *RUSLE* (Renard et al. 1997) sa stali po čiastočnej adaptácii veľmi populárne aj v našej poľnohospodárskej praxi (pozri napr. Pasák et al. 1983, Malíšek 1990, 1992, Alena 1973, 1991).

Viaceri autori (Minár a Hofierka 1992, Solín 1994, Hofierka 1997, Mitášová et al. 1997a) poukazujú na štatisticko-empirickú povahu týchto jednodimenziálnych statických modelov, ktorá dostatočne nezohľadňuje zložitú vnútornú štruktúru erózne-akumulačných procesov. Faktory v rovnici tiež nevyjadrujú všetky podstatné vlastnosti subprocesov, rovnica [1] dostatočne neodráža zložité a zväčša nelineárne vzťahy medzi faktormi a tiež neumožňuje skúmať dynamiku procesov. Za závažný nedostatok modelu *USLE* možno považovať, že neumožňuje modelovať akumulčné procesy. Oblasť s akumuláciou musia byť pred výpočtom a priori vylúčené, inak dochádza k závažným chybám modelovania. Z tohto hľadiska je tiež problematické jeho priame použitie v prostredí geografických informačných systémov (GIS).

Uvedené nedostatky modelu *USLE* a jeho modifikácií preto výrazne obmedzujú jeho regionálnu a metodickú platnosť a čoraz viac obmedzujú možnosti ďalšej inovácie. Interpretácia hodnôt odnosu pôdy (napr. $t.ha^{-1}.rok^{-1}$) má zmysel len v prípade

aplikácie modelu v lokálnej mierke, resp. pre jednotlivé svahy priamo v teréne. Napriek tomu existujú príklady modifikovaného použitia modelu v regionálnej mierke, pri ktorom sa nepracuje s absolútnymi hodnotami odnosu, ale s indexami vyjadrujúcimi ohrozenosť územia na základe použitia priestorovo spriemerovaných hodnôt vstupných údajov (Šúri et al. 1997b).

2.2 Fyzikálne modely

Podobne ako u empirických modelov, až do 60. rokov možno datovať nástup fyzikálno-matematicky orientovaného výskumu metód erózie pôdy. V súčasnosti sa postupne upúšťa od používania empirických modelov v prospech fyzikálne orientovaných, a to najmä modelu *WEPP* (Water Erosion Prediction Project, Nearing et al. 1990). Tento, ako aj ďalšie modely uvedeného typu, sú založené na vzájomnej kombinácii analytických rovnic, vyjadrujúcich jednotlivé čiastkové subprocessy s rovnou zachovania hmoty a energie. Napriek koncepčným prednostiam modelu *WEPP*, nedostatky možno nájsť najmä vo vyjadrení dynamiky eróznno-akumulačného procesu (modeluje sa len rovnovážny stav v povrchovom toku vody, ktorý sa v realite vyskytuje výnimočne), ako aj v ďalších aspektoch, z ktorých sú najvýznamnejšie nedostatočné vyjadrenie priestorovej variability reliéfu a spôsob modelovania povrchového toku vody (podrobnejšie pozri Hofierka 1997). V zásade však možno konštatovať, že fyzikálne modely lepšie rešpektujú vnútornú štruktúru eróznno-akumulačných procesov, čím tiež lepšie zhodnocujú vstupnú informáciu a rozširujú priestor svojej platnosti. Nevýhodou tejto skupiny modelov v porovnaní s empirickými je predovšetkým ich veľká náročnosť na vstupné údaje. Z toho dôvodu je ich využitie u nás zatiaľ v praxi obmedzené.

Ďalšími významnými reprezentantmi tohto prúdu sú modely *ANSWERS* (Beasley et al. 1980, Sharma a Singh 1995), *CREAMS* (Morgan 1986), *EUROSEM* (Morgan et al. 1998), *LISEM* (de Roo et al. 1996), *AGNPS* (Young et al. 1987), *SIMWE* (Mitáš a Mitášová 1998), *USPED* (Mitášová et al. 1996a), *ERDEP* (Hofierka 1997) a mnohé iné. Niektoré z týchto modelov (napr. *AGNPS* a *ANSWERS*) však v určitých častiach využívajú aj niektoré empirické zložky prevzaté z modelu *USLE*.

Eróznno-akumulačné procesy charakterizujú značnú dynamiku v čase a premenlivosť v priestore. Pokrok v oblasti GIS, zlepšenie možností modelovania, inovácie v oblasti hardvéru - najmä za posledných 10 rokov - stimulovali presun záujmu výskumu v tejto oblasti od empirických modelov k fyzikálnym a k rozsiahlejšiemu využívaniu technologickej, metodologickej a údajovej bázy GIS. Jedným z reprezentantov tohto prúdu je model *ERDEP*.

2.3 Model ERDEP

Jedným z možných riešení simulácie vodnej erózie je model *ERDEP*, komplexnejšie charakterizovaný v prácach Hofierku a Šúriho (1996) a Hofierku (1997). Vychádza z aplikácie *teórie jednotkovej sily toku a teórie fyzikálnych polí* v prostredí GIS. Teóriu jednotkovej sily toku použili Moore a Burch (1986a, 1986b) pri modelovaní prúdu sedimentov v povrchovo tečúcej vode a taktiež aj pri výpočte intenzity eróznno-akumulačných procesov pre menej kohezívne pôdy na svahoch. Autori ukázali, že *prúd sedimentov na jednotkovú šírku toku* q_s [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$] v danom bode a čase možno vyjadriť vzťahom:

$$q_s = \frac{\rho \gamma}{n^{0.6 \beta}} q^{1+0.4 \beta} \sin(\theta)^{1.3 \beta}, \quad [2]$$

kde ρ je hustota vody [kgm^{-3}], n je Manningov koeficient drsnosti povrchu [$m^{-1/3}s$], β a γ sú fyzikálne odvodené koeficienty charakterizujúce vlastnosti prenášaných častíc pôdy a tečúcej vody, θ je uhol sklonu reliéfu v danom bode, q špecifický povrchový odtok vody [m^2s]. Explicitné vyjadrenie rovníc pre výpočet koeficientov β a γ uvádzajú Moore a Burch (1986a) a Hofierka (1997).

Podľa Hofierka (1997) sa *intenzita erózie alebo akumulácie* E [$kgm^{-2}s^{-1}$] vypočíta ako divergencia 2-dimenziálneho dynamického vektorového poľa, vyjadrujúceho priestorové rozloženie hodnôt prúdu sedimentov na jednotkovú šírku toku [2]:

$$\mathbf{q}_s = \mathbf{q}_s((x,y), t), \quad [3]$$

$$E((x,y), t) = \text{div}(\mathbf{q}_s) = \nabla \mathbf{q}_s = \frac{\partial q_s}{\partial x} + \frac{\partial q_s}{\partial y}, \quad [4]$$

kde x , y sú kartézske horizontálne súradnice [m] a t je čas [s]. Takto definovaný erózný model bol nazvaný modelom ERDEP (ERosion-DEPosition, Hofierka a Šúri 1995).

Model ERDEP - v porovnaní s USLE - vychádza z fyzikálnej podstaty eróznokumuláčného procesu. Vzťah [2] platí pre konkrétny časový moment a je aplikovateľný pre jednotlivé zrážkové udalosti významné z hľadiska erózie a akumulácie. Výslednú bilanciu (celkové množstvo erodovaného a akumulovaného materiálu) možno vypočítať integrovaním pre celé obdobie, počas ktorého trval povrchový tok vody. Vplyv reliéfu vo vzťahu [4] je zahrnutý prostredníctvom sklonu, orientácie, normálovej krivosti v smere spádovej krivky a normálovej krivosti v smere dotyčnice k vrstevnici (Mitáš a Mitášová 1998). Vplyv vegetácie je vyjadrený najmä pomocou Manningovho koeficientu drsnosti n (brzdíaci účinok vegetácie). Koeficienty β a γ sú ovplyvnené najmä vlastnosťami pôdnych častíc (medián priemerov sedimentačných častíc, sedimentačná rýchlosť prenášaných častíc, hĺbka vody, sklon reliéfu a kinematická viskozita vody). Správna aplikácia týchto rovníc pre podmienky vodnej erózie pôdy na svahoch vyžaduje ich kalibráciu.

Kľúčovým prvkom modelovania prostredníctvom modelu ERDEP je dynamické modelovanie povrchového toku vody pomocou aproximačného riešenia parciálnych diferenciálnych Saint-Venantových rovníc, opisujúcich povrchový tok vody. V modeli sa používa 2D difúzna vlnová aproximácia, riešená metódou konečných rozdielov (Saghafian 1993, Saghafian et al. 1995), ktorá bola implementovaná v GIS GRASS.

Jedným z obmedzení fyzikálnych modelov je náročnosť získania vstupných parametrov. V prípade modelu ERDEP sa jedná najmä o podrobné merania *intenzity a dĺžky trvania zrážok, infiltračných vlastností pôdy, drsnosti povrchu a sedimentačných vlastností pôdnych častíc (sedimentov)*. V prípadoch, keď nie je možné vykonať ani odhad uvedených parametrov, je možné použiť len údaje o reliéfe a vypočítať *index potenciálu reliéfu pre eróziu a akumuláciu* aproximáciou vzťahov [4] a [2]:

$$E^*(x,y) = \text{div}(\mathbf{T}), \quad [5]$$

kde

$$\mathbf{T}(x,y) = \mathbf{A}_s^{1.4} \sin(\theta)^{1.3}, \quad [6]$$

kde x, y sú kartézské horizontálne súradnice, θ je uhol sklonu reliéfu v danom bode, \mathbf{A}_s špecifická prispievajúca plocha [$m^2 m^{-1}$], ktorá v tomto vzťahu aproximuje veľkosť povrchového odtoku vody blízku rovnovážnemu stavu.

Vzťah [5] modeluje len relatívne priestorové zmeny intenzity eróznno-akumulačného procesu, pričom neberie do úvahy zmeny vo vlastnostiach pôdy a vegetácie a predstavuje vlastne len *vplyv reliéfu* na intenzitu erózie a akumulácie. Zahŕňa nielen vplyv sklonu, ale tiež aj tvarov reliéfu, kontrolujúcich konvergenciu a divergenciu povrchového toku. Výpočet potenciálu reliéfu pre eróziu a akumuláciu E^* vychádza z výpočtu partiálnych derivácií vzťahu [6]. Tento vzťah má vyjadrenie blízke modifikovanému LS faktoru modelu USLE (Mitášová et al. 1996b).

Zavedenie parametra *času* je kľúčové pre modelovanie dynamiky procesu na úrovni jednotlivých eróznnych udalostí a v konečnom dôsledku aj pre presnejšie modelovanie strednodobých (počas jedného vegetačného obdobia) a dlhodobých (v priebehu viacerých rokov) zmien výsledných efektov eróznno-akumulačných procesov. Model ERDEP pracuje s minimálnym časovým krokom 1 sekunda, ktorý je určený použitým aproximačným riešením pre modelovanie povrchového toku vody.

Pre každý bod na reliéfe je možné vypočítať výslednú *bilanciu akumulácie a erózie materiálu* po skončení eróznnej udalosti. Na niektorých plochách môže počas jednej eróznnej udalosti dochádzať v jednotlivých časových úsekoch k zmene charakteru procesu. Napríklad počas zrážkovej udalosti sa so zväčšovaním povrchového odtoku zvyčajne presúva hranica medzi zónami čistej erózie a akumulácie dolu v smere toku. Pri zvyšovaní unášacej schopnosti povrchového toku vody sa tak čistý prínos materiálu v danom bode na svahu môže zmeniť na čistý odnos.

Výsledný kumulatívny efekt E_b [$kgm^{-2}s^{-1}$] v priestore a čase meniacich sa eróznno-akumulačných procesov je opísaný integrálom:

$$E_b = \int_{t_0}^{t_k} E((x,y), t) dt, \quad [7]$$

kde t_0 je počiatočný čas [s] vzniku a t_k posledný čas [s] výskytu povrchového toku. V praktickom riešení môže byť integrál vo vzťahu [7] nahradený vhodnou aproximačnou sumou s časovým krokom Δt .

3 GIS AKO PROSTREDIE PRE MODELOVANIE ERÓZIE

Vodná erózia pôdy je problematika, ktorá sa často rieši v prostredí GIS. Je to vcelku pochopiteľné, keďže sa jedná o komplexný problém, vyžadujúci integráciu zložitých algoritmov, ako aj údajov z rôznych zdrojov. GIS poskytuje nástroje potrebné pre všetky fázy výskumu erózie v krajine - identifikáciu a mapovanie, analýzu, syntézu, modelovanie, simuláciu, ako aj ich napojenie na modely (metodiky) optimalizácie priestorovej štruktúry krajiny a hodnotenia alternatívnych ochranných opatrení.

Velký význam z hľadiska vhodnej implementácie konkrétneho erózneho modelu a kvalifikovanej interpretácie výsledkov má výber vhodného údajového modelu. Mechanická aplikácia erózných modelov v GIS môže byť príčinou chybných výsledkov. Väčšina - predovšetkým empirických - modelov nevznikla za účelom ich implementácie v prostredí GIS. Klasickým príkladom je už vyššie spomínaný model USLE, ktorý sa často aplikuje s použitím údajového modelu entít s presne definovanými hranicami vo forme polygónov. Proces vodnej erózie pôdy je však v zásade javom spojitým, ktorého hodnoty sa menia v priestore aj v čase. Preto z hľadiska modelovania eróžno-akumulačných procesov v GIS je najvhodnejšie použitie fyzikálnych modelov a *údajového modelu spojitých polí*. Vzhľadom na výhody počítačového spracovania, ako aj prepojenia na digitálne údaje DPZ, najčastejšie sa používajú údajové štruktúry *pravidelných sietí* označované ako raster (grid).

4 ÚDAJE A ICH VÝZNAM PRE ODVODENIE VSTUPNÝCH PARAMETROV DO MODELOV VODNEJ ERÓZIE

Jedným z limitov pre modelovanie vodnej erózie pôdy je dostupnosť relevantných priestorových údajov v požadovaných časových horizontoch. Potrebu podkladových údajov pre odvedenie vstupných parametrov do modelu je potrebné hodnotiť z hľadiska mierky spracovania (priestorovej a časovej) a časových, finančných a organizačno-personálnych nárokov.

Pri detailných mierkach (1:10 000 a väčšie) sa zväčša používajú údaje pomerne dobre vystihujúce reálnu priestorovú diferenciáciu sledovaných javov. Pri menších mierkach sa spravidla narába s údajmi čiastočne generalizovanými, a preto charakterizujúcimi iba trendové hodnoty. Pri aplikácii modelov v lokálnych mierkach má zmysel uvažovať o kvantitatívnych výsledkoch, v regionálnych mierkach má však zmysel hodnotiť výsledky iba v polohe erózných indexov alebo nominálnych kategórií.

Okrem mierky priestorovej je potrebné pracovať s mierkou časovou. Rýchlosť zmien (dynamika) jednotlivých prvkov krajiny je rôzna (chod počasia, sezónny cyklus, dlhodobé zmeny). Niektoré parametre nie je možné odvodiť priamo fyzikálne, pretože podkladové údaje k nim sú buď veľmi ťažko, alebo vôbec nemerateľné, častokrát sa odhadujú empiricky. Odbornému odhadu niektorých parametrov môžu brániť nedostatočné znalosti, resp. skúsenosti, a tak sa často aproximuje na základe známych koeficientov publikovaných v literatúre.

Vstupné parametre do modelov je možné odvodiť z údajov získaných rôznymi metódami:

- z existujúcich topografických, resp. tematických *máp*,
- mapovaním, resp. meraním *v teréne*,
- z údajov *dialkového prieskumu Zeme*.

4.1 Parametre erózných modelov odvodené z máp

Možnosti použitia máp vychádzajú najmä z plošného rozsahu sledovaného javu a jeho priestorovej diferenciácie. Pri modelovaní efektov jednotlivých erózných udalostí sú použiteľné mapy v mierkach 1:10 000 alebo väčších, pretože optimálne

rozlíšenie rastra pri modelovaní vodnej erózie je 2-20 metrov (Moore et al. 1992).

Z topografických máp sa odvodzujú predovšetkým morfometrické parametre reliéfu, hlavne tie, ktoré ovplyvňujú povrchový tok vody - *sklon svahu v smere spádových kriviek, orientácia voči svetovým stranám, krivosti a špecifická prispievajúca plocha* - sú integrované v digitálnych modeloch reliéfu (DMR). Tvorba DMR a analýza geometrických vlastností reliéfu je na teoretickej úrovni dobre rozpracovaná v zahraničnej aj domácej literatúre (pozri napr. Krcho 1990, Moore et al. 1991a). Kvalita dostupných GIS modulov na tvorbu DMR je rozdielna a ani ich správne použitie nie je triviálne, nakoľko vyžaduje odborné znalosti z problematiky modelovania reliéfu a jeho morfometrickej analýzy (bližšie pozri práce napr. Šúri et al. 1997a, Hofierka et al. 1998).

Pre menšie (regionálne) mierky sa zväčša odvodzujú požadované parametre (reprezentujúce pôdu, vegetáciu, krajinnú pokrývku atď.) z existujúcich tematických máp.

4.2 Parametre erózných modelov odvodené z merania a mapovania v teréne

Celý rad údajov sa opiera o merania a mapovania v teréne (vlastnosti pôdy, meteorologicko-klimatické údaje). Tieto údaje väčšinou majú bodovú povahu (pôdne sondy, vrty, iné meracie zariadenia, pozri napr. Fulajtár 1995). Na použitie v modeloch je potrebné tieto merania interpolovať tak, aby ich priestorová distribúcia čo najviac zodpovedala realite. Vzhľadom na komplikovaný priebeh mnohých charakteristík pôdy ako aj atmosféry, problém ich interpolácie zväčša nie je iba jednoduchou matematickou záležitosťou, ale vyžaduje istú dávku empirickej skúsenosti (pozri napr. Hofierka a Šúri 1996).

4.3 Parametre erózných modelov odvodené z údajov DPZ

Dialkový prieskum Zeme (DPZ) je schopný nedostatok priestorových údajov čiastočne zmierniť. Poskytuje možnosť extrapolácie bodových údajov do priestoru, operatívneho sledovania zmien v krajine, ich analýzy a prezentácie v GIS.

V súčasnosti technologické možnosti ako aj stupeň poznania umožňujú podstatne efektívnejšie využívať informačný potenciál dostupných leteckých snímok a satelitných obrazových záznamov. Čoraz častejšie sa využívajú cenovo prístupné softvérové balíky na digitálne spracovanie obrazu a GIS, ktoré umožňujú prevod analógových materiálov do digitálnej podoby a ich integráciu s inými dostupnými údajmi, najmä staršími digitálnymi pôdnymi databázami, topografickým mapovým podkladom, digitálnymi modelmi reliéfu, využitím krajiny, s mapou poľnohospodárskych honov, či vlastníckych vzťahov.

Prehľad a stručnú charakteristiku najpoužívanejších údajov DPZ dostupných na Slovensku poskytujú Feranec et al. (1997). Metódy interpretácie údajov DPZ v prostredí GIS vo vzťahu k problematike mapovania a modelovania erózie pôdy opisuje Šúri (1996, 1998). Prístupy vizuálnej a digitálnej interpretácie údajov DPZ poskytujú metodické nástroje na určenie niektorých parametrov vstupujúcich do erózných modelov, popisujúcich vlastnosti najmä *reliéfu, pôdy, vegetačnej pokrývky, využitia krajiny* (napr. použitie agrotechnológie, protierózných opatrení a pod.). Presnosť a detailnosť takto odvodených informácií nie je väčšinou porovnateľná s terénnymi

metódami, avšak ich význam spočíva v možnosti extrapolácie údajov získaných terénnym prieskumom na vybraných lokalitách do širšieho priestoru a v operatívnosti získania priestorových údajov. Kvantitatívne údaje DPZ nie je síce možné využiť na priamy vstup do fyzikálnych erózných modelov, ale umožňujú získať charakteristiky komponentov krajiny (napr. údaje o druhovom zložení vegetačného krytu, celkovom množstve biomasy, vlhkosti povrchovej časti pôdy a pod.), pomocou ktorých je možné niektoré požadované parametre odvodiť.

5 APLIKÁCIE ERÓZNYCH MODELOV NA SLOVENSKU

Záujem o modelovanie erózie pôdy na Slovensku a v bývalom Československu sa datuje už viac ako 20 rokov (pozri Solín 1994). Tak ako vo svete aj u nás stále dominujú predovšetkým modely empirické, ktoré si pre svoju relatívnu ľahkú aplikovateľnosť adaptovala a osvojila predovšetkým poľnohospodárska a plánovacia prax. Rozvoj matematicko-fyzikálneho aparátu ako aj metód GIS a DPZ akceleroval významný pokrok aj v oblasti vývoja fyzikálnych modelov a ich aplikácie v podmienkach Slovenska.

5.1 Aplikácie empirických modelov

Relatívne jednoduché empirické modely sa u nás začali aplikovať ešte v časoch neexistencie výkonnej výpočtovej techniky. Jednalo sa predovšetkým o rôzne analógie modelu USLE, pričom parametre sa väčšinou odvodzovali expertným odhadom (pozri napr. Stehlík 1970, Mírdriak 1977, 1980, Bučko 1980, Bučko a Zachar 1980).

Snaha o exaktnejšiu kvantifikáciu vstupných parametrov (a tým aj výsledných hodnôt) sa objavuje v 70. rokoch, kedy sa predovšetkým na českých výskumných pracoviskách začalo pracovať na adaptácii modelu USLE pre nasadenie v poľnohospodárstve (pozri napr. Pašák et al. 1983, Malíšek 1990, 1992, Alena 1973, 1991). Na Slovensku tieto snahy kulminovali najmä na prelome 80. a 90. rokov. Na základe dostupných poznatkov možno konštatovať, že v našej vedeckej, ale aj aplikáčnej praxi sa i doposiaľ používajú predovšetkým rôzne variácie modelu *USLE*. V lokálnych mierkach sa uvedený model aplikoval na výpočet hodnôt odnosu pôdy v záujmovom území na viacerých pracoviskách, ako napr. Stavebná fakulta STU, Prírodovedecká fakulta UK (Minár a Tremboš 1994, Tremboš et al. 1994), Agronomická fakulta SPU (Šimonides 1996, 1997), Výskumný ústav pôdnej úrodnosti, Ústav krajinnej ekológie SAV.

V posledných rokoch je zvýšený záujem o aplikáciu digitálnych údajových databáz a metód GIS a DPZ. Istú renesanciu aplikácie expertne-orientovaných a semi-kvantitatívnych prístupov možno zaznamenať v prácach Geografického ústavu SAV polovice 90. rokov. Pre odhad potenciálneho a reálneho erózneho ohrozenia Slovenska v mierke 1:500 000 bol upravený model USLE (pozri Šúri et al. 1997b). Vstupné parametre do modelu boli odvodené z údajov zodpovedajúcim mierke 1:100 000 - 1:500 000 (erózna účinnosť zrážok, pôdne druhy, digitálny model reliéfu Slovenska, krajinná pokrývka CORINE). Po aplikácii jednoduchých operácií súčinu na indexom ohodnotených údajových vrstvách, výsledné databázy a mapy reprezentujú iba slovnopopísané kategórie ohrozenosti. Mapa erózie pôd Slovenska (1:500 000) bola tiež vytvorená na Výskumnom ústave pôdoznalectva a ochrany pôdy na základe odhadu zo sklonu reliéfu, ktorý je v intervalovej škále dostupný v databáze bonitovaných

pôdnych ekologických jednotiek (pozri Ilavská 1998). Na povodí Jablonky bolo uskutočnených viacero experimentov, ktorých spoločným menovateľom bolo kvalitatívne (rule-based) modelovanie (pozri Solín a Lehotský 1996, Solín a Cebecauer 1998, Hanušin 1998). Prínosom týchto prác je snaha o objektivizáciu v rovine tvorby relevantných priestorových databáz (o pôde, krajinskej pokrývke, reliéfe a pod.), ako aj v rovine formalizácie empirických poznatkov a hodnotiacich postupov. Uvedené prístupy majú svoje miesto najmä v štúdiách pre regionálne mierky, pričom ich nespornou výhodou je aj praktická aplikovateľnosť. Isté výhrady k oživovaniu týchto metód vyplývajú zo značného subjektivismu pri zovšeobecňovaní poznatkov v procese tvorby klasifikačných schém a priraďovania váh jednotlivým faktorom.

5.2 Aplikácie fyzikálnych modelov

Vzhľadom k nárokom na vstupné údaje pre fyzikálne modely sa tieto aplikujú najmä na relatívne malé územia (predovšetkým povodia) s dostatkom údajov najmä z terénu. V poslednom období je zrejmä zvýšená snaha o prepojenie, prípadne plnú integráciu s prostredím GIS (Moore et al. 1991, 1992, de Roo 1993, de Roo et al. 1996, Hofierka a Šúri 1996, Mitašová et al. 1997b, Mitaš a Mitašová 1998 a pod.). Použitie GIS je jedným zo základných predpokladov na modelovanie erózných procesov na väčších územiach, ako ukazuje príklad environmentálnych aplikácií prezentovaných prácou Mitašovej et al. (1998).

Na Slovensku sa experimentálne aktivity realizovali s modelmi *ANSWERS*, *AnnGNPS98* a *SMODERP* na Stavebnej fakulte STU v Bratislave (Hlavčová 1993 a, b, Hlavčová a Macura 1992, 1993, Hlavčová a Svobodová 1995).

Medzi ďalšie aktivity patrí vývoj a aplikácie modelu *ERDEP* v spolupráci Prírodovedeckej fakulty UK, Geografického ústavu SAV v Bratislave a čiastočne aj University of Illinois (Urbana-Champaign, USA). Prvou aplikáciou súvisiacou s modelom *ERDEP* bolo použitie indexu topografického potenciálu pre eróziu a akumuláciu, spolu so satelitnými údajmi v oblasti Bieleho kostola na Trnavskej pahorkatine na mapovanie prejavov vodnej erózie (Šúri a Hofierka 1994, Šúri 1998). V ďalších rokoch bol vyvíjaný model *ERDEP* s cieľom simulácie a sledovania zmien v dynamike intenzity erózie a akumulácie počas eróznej udalosti a pod vplyvom zmien využitia krajiny. Model bol aplikovaný na študijnom území Kostolné na Myjavskej pahorkatine a v oblasti Trnavskej pahorkatiny. Simulácia bola uskutočnená na základe vypočítaných parametrov reliéfu (z digitálnych modelov reliéfu) a Manningovho koeficientu drsnosti povrchu pre vybrané časové horizonty, odvodeného z krajinskej pokrývky mapovanej z leteckých snímok a satelitných údajov (pozri Hofierka a Šúri 1995, Hofierka a Šúri 1996, Šúri 1998). Model *ERDEP* bol tiež v spolupráci s Výskumným ústavom pôdnej úrodnosti použitý na experimentálnom území Mochovce.

Pomerne rozsiahle príklady použitia sú známe pre modely *SIMWE* a *USPED*. Model *SIMWE* vychádza z niektorých teoretických predpokladov modelu *WEPP*, pričom ho obohacuje o spôsob riešenia kontinuálnych rovníc popisujúcich povrchový tok vody, použitie multivariačných polí a prepojenie s GIS. Model *USPED* má z teoreticko-metodologického hľadiska blízko najmä k modelu *ERDEP*. Modely *SIMWE* a *USPED* boli úspešne použité pri modelovaní eróznej ohrozenosti cvičných území používaných armádou USA (Mitašová et al. 1998) a modelového územia v Nemecku (Mitaš a Mitašová 1998).

6 ZÁVER

Modelovanie eróznno-akumulačných procesov zahŕňa pestré spektrum prístupov, od expertných systémov cez modely definované na báze empirických meraní až po deterministické modely vychádzajúce z fyzikálnych princípov. Ako vyplýva z prehľadu, každý z prístupov má zmysel či už z hľadiska nárokov na kvalitu výstupných informácií, financie, dostupnosť údajov, ale aj mierku spracovania. Fyzikálne orientované modely (napr. WEPP, ERDEP) sa vzhľadom na náročnosť vstupov aplikujú spravidla v rámci experimentálnych projektov na malých povodiach, kde je predpoklad dostatočného zabezpečenia vstupných údajov a tiež personálne zabezpečenie. Jedná sa predovšetkým o lokálne štúdie vo veľkých mierkach. Empirické modely (napr. USLE) sú populárne v praktických aplikáciách pre svoju relatívnu jednoduchosť, "rozumné nároky" na vstupné údaje, a teda aj finančné a personálne zabezpečenie. Ich nevýhody vyplývajú práve z obmedzenej platnosti ich regionálneho a metodického nasadenia, ako aj z nebezpečia nesprávnej interpretácie výsledkov.

Z hľadiska ďalšieho smerovania vývoja v tejto oblasti sa potvrdzuje príklon k fyzikálne orientovaným modelom a so snahou o ich prepojenie alebo implementáciu v GIS. Pri potrebe analyzovania rozsiahlejších území je nevyhnutné budovať digitálne databázy charakteristík komponentov krajiny, z ktorých bude možné odvodiť potrebné parametre týchto modelov. Časové rady digitálnych údajov umožnia lepšie sledovať a modelovať vývojové tendencie v ohrozenosti eróznno-akumulačnými procesmi. V tomto smere budú zohrávať čoraz významnejšiu úlohu metódy DPZ, avšak detailný terénny výskum bude naďalej nezastupiteľný.

Vznik tohto príspevku bol čiastočne podporený grantovou agentúrou VEGA, v rámci projektu č. 2/5043 "Hodnotenie súčasnej krajiny aplikáciou údajov z databáz CORINE land cover podľa environmentálnych princípov" riešeného na Geografickom ústave SAV v r. 1999.

LITERATÚRA

- ALENA, F. (1973). *Metodická pomôcka pre návrh opatrení protieróznej ochrany poľnohospodárskeho pôdneho fondu v rámci komplexného zúrodnenia pôdy*. Bratislava (Štátna melioračná správa).
- ALENA, F. (1991). *Protierózna ochrana na ornej pôde*. Bratislava (Štátna melioračná správa).
- BUČKO, Š. (1980). Regióny erózie pôdy. In Mazúr, E., ed. *Atlas Slovenskej socialistickej republiky*. Bratislava (SAV a SÚGK), p. 76.
- BUČKO, Š., ZACHAR, D. (1980). Potenciálna erózia pôdy. In Mazúr, E., ed. *Atlas Slovenskej socialistickej republiky*. Bratislava (SAV a SÚGK), p. 76.
- BEASLEY, D. B., HUGGINS, L. F., MONKE, E. J. (1980). ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 23, 938-944.
- De ROO, A. P. J. (1993). *Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems*. Utrecht (Nederlandse Geografische Studies).
- De ROO, A. P. J., WESSELING, JETTEN, V., RITSEMA, C. (1996). LISEM: A single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. *Hydrological processes*, 10, 1107-1117.

- FERANEC, J., CEBECAUEROVÁ, M., CEBECAUER, T., HUSÁR, K., OŤAHEL, J., PRAVDA, J., ŠŮRI, M. (1997). *Analýza zmien krajiny aplikáciou údajov diaľkového prieskumu Zeme*. Geographia Slovaca, 13. Bratislava (Geografický ústav SAV).
- FULAJTÁR, E., jun. (1995). Methods for determination and assessment of soil erosion. In Čurlík, J., et al., eds. *Present Methods in Soil Protection Used in Slovakia and their Comparison with German and International Standards*. Bratislava (Výskumný ústav pôdnej úrodnosti).
- HANUŠIN, J. (1998). Metodika Susceptibility to Soil Erosionhodnotenia vplyvu zmien vo využití zeme na zmenu veľkosti rizika vodnej erózie pôdy (prípadová štúdia: časť povodia potoka Trstie). *Geografický časopis*, 50, 59-76.
- HLAVČOVÁ, K. (1993a). Vplyv stochastických vlastností zrážok na plošný erózný splach zo svahu. *Vodohospodársky časopis*, 41, 68-82.
- HLAVČOVÁ, K. (1993b). Changes of precipitation during a year and their influence on soil loss from a small basin. In *The International Symposium of Runoff and Sediment Yield Modelling*. Warsaw (SGGW), pp. 123-127.
- HLAVČOVÁ, K., MACURA, V. (1992). Modelling of overland flow and erosion processes. In *5th International Symposium on River Sedimentation*. Karlsruhe (IAHS), pp.1053-1058.
- HLAVČOVÁ, K., MACURA, V. (1993). Modelling of overland flow and erosion processes. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 1, 3-8.
- HLAVČOVÁ, K., SVOBODOVÁ, H. (1995). Plošné znečistenie vodných zdrojov splaveninami a možnosti jeho posúdenia pomocou GIS. In *Geotechnické problémy životného prostredia*. Bratislava, 18. - 19.9.1995. Bratislava (STU), pp. 127-132.
- HOFIERKA, J. (1997). *Modelovanie prírodných javov v prostredí geografického informačného systému*. Kadidátska dizertačná práca, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava.
- HOFIERKA, J., ŠŮRI, M. (1995). Modelovanie a kartografické zobrazovanie vodnej erózie pôdy s využitím GIS-u a údajov Landsat TM. *Geodetický a kartografický obzor*, 41, 198-203.
- HOFIERKA, J., ŠŮRI, M. (1996) Modelling spatial and temporal changes of soil water erosion. *Geografický časopis*, 48, 255-269.
- HOFIERKA, J., ŠŮRI, M., CEBECAUER, T. (1998). Rastrové digitálne modely reliéfu: tvorba a použitie v praxi. *GEOinfo*, 2, 48-50.
- ILAVSKÁ, B. (1998). Využitie informačného systému o pôde pri ochrane a využívaní pôdy. In Jambor, P., ed. *Trvalo udržateľná úrodnosť pôdy a protierózna ochrana*. Bratislava (Výskumný ústav pôdnej úrodnosti), pp. 117-123.
- KRCHO, J. (1990). *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. Bratislava (Veda).
- LINKES, V. et al. (1997). *Monitoring pôd Slovenskej republiky, súčasný stav monitorovaných vlastností pôd. Výsledky čiastkového monitorovacieho systému pôda ako súčasť Monitoringu životného prostredia Slovenskej republiky za obdobie 1992-1996*. Bratislava (Výskumný ústav pôdnej úrodnosti).
- LEHOTSKÝ, M., STANKOVIANSKY, M. (1992). Detekcia zrážkových eróznno-akumulačných procesov na základe stanovenia obsahu izotopu Cs-137 v pôdnom profile. *Geografický časopis*, 44, 273-287.
- MALÍŠEK, A. (1990). Zhodnotenie faktora eróznej účinnosti privalovej zrážky. *Geografický časopis*, 42, 410-422.
- MALÍŠEK, A. (1992). Optimálna dĺžka svahu v závislosti na vodnej erózii. *Vedecké práce Výskumného ústavu pôdnej úrodnosti*. Bratislava (VÚPÚ), pp. 203-220.

- MIDRIAK, R. (1977). Potenciálna erózia lesnej pôdy ČSSR. *Vedecké práce Výskumného ústavu lesného hospodárstva*. Zvolen (VÚLH), pp. 203-228.
- MIDRIAK, R. (1980). Potenciálna erózia pôdy vo vysokých pohoriach československých Karpát. *Geografický časopis*, 32, 276-286.
- MINÁR, J., HOFIERKA, J. (1992). Svahové modely vodnej erózie pôdy, súčasný stav a perspektívy. *Geografický časopis*, 41, 330-341.
- MINÁR, J., TREMBOŠ, P. (1994). Prírodné hazardy - hrozby, niektoré postupy ich hodnotenia. *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae, Geographica* 35, 173-194.
- MITÁŠ, L., MITÁŠOVÁ, H. (1998). Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, 34, 505-516.
- MITÁŠOVÁ, H., BROWN, W., JOHNSTON, D., MITÁŠ, L. (1996). *GIS tools for erosion/deposition modeling and multidimensional visualization. Part II: Unit stream power-based erosion/deposition modeling and enhanced dynamic visualization*. Report for USA CERL, University of Illinois, Urbana-Champaign.
- MITÁŠOVÁ, H., BROWN, W., MITÁŠ, L. (1998). *Topographic analysis and erosion/deposition at instalations*, <http://www2.gis.uiuc.edu:2280/modviz/einstal.html>.
- MITÁŠOVÁ, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M., IVERSON, L. R. (1996). Modelling topography potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of GIS*, 10, 629-641.
- MITÁŠOVÁ, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M., IVERSON, L. R. (1997). Reply to comment by Desmet and Govers. *International Journal of GIS*, 11, 611-618.
- MITÁŠOVÁ, H., MITÁŠ, L., BROWN, W. M., JOHNSTON, D. (1997). *Multidimensional soil erosion/deposition modeling. Part IV and V: Process based erosion simulation for spatially complex conditions and its applications*. Report for USA CERL, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL, <http://www2.gis.uiuc.edu:2280/modviz/reports/cerl97/rep97.htm>.
- MOORE, I. D., BURCH, G. J. (1986a). Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory. *Water Resources Research*, 22, 1350-1360.
- MOORE, I. D., BURCH, G. J. (1986b). Modelling erosion and deposition: topographic effects. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 29, 1624-1630.
- MOORE, I. D., FOSTER, G. R. (1990): Hydraulics and overland flow. In Anderson, A. M. G., Burt, T. P., eds. *Process Studies in Hillslope Hydrology*. New York (Wiley), pp. 215-254.
- MOORE, I. D., GRAYSON, R. B., LADSON, A. R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, 11, 47-54.
- MOORE, I. D., TURNER, A. K., WILSON, J. P., JENSON, S. K., BAND, L. E. (1991). GIS and land surface - subsurface process modelling. In Goodchild, M. F., et al., eds. *Geographic Information Systems and Environmental Modelling*, New York (Oxford University Press), pp. 196-230.
- MOORE, I. D., WILSON, J. P., CIESOLKA, C. A. (1992): Soil erosion prediction and GIS: Linking theory and practice. *Proceedings of Geographic Information Systems for Soil Erosion management Conference (manuscript)*.
- MORGAN, R. P. C. (1986). *Soil Erosion and Conservation*. Burnt Mill (Longman).

- MORGAN, R. P. C., QUINTON, J. N., SMITH, R. E., GOVERS, G., POESEN, J. W. A., AUERSWALD, K., CHISCI, G., TORRI, D. STYCZEN, M. E., FOLLY, A. J. V. (1998). *The European Soil Erosion Model (EUROSEM): Documentation and User Guide, Version 3.6*. Silsoe College (Cranfield University).
- NEARING, M. A., LANE, L. J., ALBERTS, E. E., LAFLEN, J. M. (1990) Prediction technology for soil erosion by water: Status and research needs. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1702-1711.
- PASÁK, V., JANEČEK, M., ŠABATA, M. (1983). *Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metodiky pro zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe*, 11. Praha (Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství).
- RENARD, K. G., FOSTER, G. R., WEESIES, G. A., MCCOOL, D. K., YODER, D. C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agricultural Handbook, 703. Washington (US Department of Agriculture - Agricultural Research Service).
- SAGHAFIAN, B. (1993). Implementation of a distributed hydrologic model within GRASS. *Second Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Boulder. (manuscript).
- SAGHAFIAN, B., JULIEN, P. Y., OGDEN, F. L. (1995): Similarity in catchment response. 1. Stationary rainstorms. *Water Resources Research*, 31, 1533-1541.
- SHARMA, K.D., SINGH, S. (1995). Satellite remote sensing for soil erosion modelling using the ANSWERS model. *Hydrological Sciences - Journal des Sciences Hydrologiques*, 40, 259-272.
- SOLÍN, L. (1994). Typizácia krajiny z hľadiska citlivosti na vodnú eróziu pôdy - súčasný stav jej výskumu. *Geografický časopis*, 46, 399-407.
- SOLÍN, L., CEBECAUER, T. (1998). Vplyv kolektivizácie poľnohospodárstva na vodnú eróziu pôdy v povodí Jablonka. *Geografický časopis*, 50, 35-57.
- SOLÍN, L., LEHOTSKÝ, M. (1996). Susceptibility of the Jablonka Catchment to Soil Erosion. *Geografický časopis*, 48, 153-170.
- STEHLÍK, O. (1970). *Geografická rajonizace půdy v ČSR. Metodika zpracování*. Studia Geographica, 13. Brno (GÚ ČSAV).
- ŠIMONIDES, I. (1996). Výpočet potenciálnej erózie pomocou geografického informačného systému IDRISI. In *Theoretical and Practical Utilization of Modern Equipments and Models with Orientation on the Environment, Water and Agriculture*. Banská Bystrica (Tempus Phare Joint European Network), pp. 73-77.
- ŠIMONIDES, I. (1997). *Vplyv poľnohospodárskej činnosti na pohyb vody v povodí z hľadiska ochrany pôdy a vodných zdrojov. Záverečná správa etapy č. 6 grant. projektu 1082/94*, Slovenská poľnohospodárska univerzita, Nitra.
- ŠÚRI, M. (1996). Analýza a hodnotenie možností využitia diaľkového prieskumu Zeme vo výskume erózie pôdy. *Geografický časopis*, 48, 73-92.
- ŠÚRI, M. (1998). *Mapovanie a modelovanie vodnej erózie pôdy s využitím údajov diaľkového prieskumu Zeme v prostredí geografických informačných systémov*. Kandidátska dizertačná práca, Geografický ústav SAV, Bratislava. p. 103.
- ŠÚRI, M., CEBECAUER, T., HOFIERKA, J. (1997). Tvorba digitálneho modelu reliéfu Slovenskej republiky. *Geodetický a kartografický obzor*, 43, 257-262.
- ŠÚRI, M., CEBECAUER, T., FERANEC, J., FULAJTÁR, E. (1997). Soil Water Erosion Risk Assessment at Regional Scale Using Integrated Data Analysis. In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing. Denver (ERIM)*, pp. 315-322.

- ŠÚRI M., HOFIERKA J. (1994). Soil water erosion identification using satellite and DTM data. In Harts, J. J. et al., eds. *Proceedings of EGIS/MARI European Conference and Exhibition on GIS*, Utrecht/Amsterdam (EGIS Foundation), pp. 937-944.
- ŠÚRI, M., LEHOTSKÝ, L. (1995). Identifikácia erózie pôdy použitím údajov družice SPOT. *Geographia Slovaca*, 10, 265-272.
- TREMBOŠ, P., MINÁR, J., MACHOVÁ, Z. (1994). Identification of selected natural hazards from viewpoint of the evaluation of environmental limits. *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae, Geographica*, 34, 135-151.
- WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning*. Agriculture Handbook, No. 537, Washington D. C. (US Department of Agriculture).
- YOUNG, R. A., ONSTAD, C. A., BOSCH, D. D., ANDERSON, W. P. (1987). *AGNPS, agricultural non-point-source pollution model. A Watershed Analysis Tool*. USDA Conservation Research Report, 35.

Jaroslav Hofierka, Marcel Šúri

WATER EROSION MODELS AND THEIR APPLICATIONS IN SLOVAKIA

Soil water erosion is a complicated and dynamic phenomenon with strong temporal and spatial variability. This is caused by overland flow dynamics and environmental conditions of the erosion processes.

The aim of water erosion modelling is to simulate erosion processes including overland flow, detachment, transport and deposition of soil particles and their effects. Some *empirical models* - *USLE* being the typical representative (Wischmeier and Smith 1978) - do not describe explicitly these partial processes but only the resulting effects - soil loss from the study area. Some authors (e.g. Minár a Hofierka 1992, Solín 1994, Hofierka 1997, Mitášová et al. 1997) pointed out on statistical and empirical properties of these mostly one-dimensional, static models. Another problem with the USLE model is that areas experiencing net deposition must be *a-priori* excluded. Therefore it is quite problematic to implement this kind of models in geographic information system (GIS).

Physically-based models usually explicitly use overland flow and partial erosion processes. The most known and widely used are *ANSWERS* (Beasley et al. 1980, Sharma a Singh 1995), *CREAMS* (Morgan 1986), *EUROSEM* (Morgan et al. 1992), *LISEM* (de Roo et al. 1996), *AGNPS* (Young et al. 1987), *SIMWE* (Mitáš a Mitášová 1998), *USPED* (Mitášová et al. 1996a), *ERDEP* (Hofierka 1997) and others. However, some of these models (e.g. *AGNPS* or *ANSWERS*) have implemented some empirical parts from the *USLE* model.

Water erosion is often modelled in GIS, as it provides necessary tools for every solution phase - identification and mapping, analysis, synthesis, modelling, simulation as well as interlink to the environmental models dealing with the landscape structure optimization. GIS is therefore an appropriate environment for physically-based water erosion modelling.

Input parameters for erosion models can be derived from different sources - from existing topographic or thematic maps, field measuring/mapping or from remote sensing data.

A traditionally strong position in Slovak (and former Czechoslovak) soil erosion research have empirical models (*USLE* and its modifications) for its applicability, especially in agricultural practice (see e.g. Stehlík 1970, Midriak 1977, 1980, Bučko 1980, Bučko a Zachar 1980, Pasák et al. 1983, Malíšek 1990, 1992, Alena 1973, 1991). More recent examples point also to their practical applications and modelling possibilities using GIS (Minár a Tremboš 1994, Tremboš et al. 1994, Solín a Lehotský 1996, Šimonides 1996, 1997, Šúri et al. 1997b, Solín a Cebecauer 1998, Hanušin 1998).

The rapid development in GIS and remote sensing technology and methodology stimulates advances in physically-based modelling in Slovakia as well. An example of such effort is the ERDEP model presented in Hofierka a Šúri 1996 and Hofierka 1997. The ERDEP model is based on the unit stream power and physical fields theories and is completely implemented in a GRASS GIS.

Physically-based models ANSWERS, AnnGNPS98 and SMODERP were experimentally applied on Faculty of Civil Engineering STU in Bratislava (Hlavčová 1993 a, b, Hlavčová a Macura 1992, 1993, Hlavčová a Svobodová 1995).

Translated by the authors