Ottimizzazione delle opere di ingegneria naturalistica mediante modellazione *field scale* dei processi erosivi

Dott. ing. Alberto Pistocchi
Dott. ing. Paolo Mazzoli

Riassunto

Il lavoro presenta l'implementazione di un modello di previsione della dinamica dei sedimenti alla scala del versante. Il modello, sviluppato su foglio elettronico Excel©, consiste in una versione modificata dei modelli EuroSEM (di moto vario) e WEPP (di moto permanente) ed è potenzialmente utilizzabile per la simulazione del distacco e trasporto di sedimento durante un evento di precipitazione di forte intensità e breve durata ed è diretto a supportare il dimensionamento degli interventi di ingegneria naturalistica e protezione dall'erosione. Si illustra una applicazione del modello in un caso di studio reale facendo uso di parametri dedotti dalla letteratura, e si delineano le esigenze di approfondimento sperimentale finalizzate alla calibrazione dei parametri in modo da consentire un uso generalizzato nell'ottimizzazione del progetto e nella riduzione dei costi.

Abstract

The paper illustrates the implementation of a predictive model for sediment dynamics at the field scale for the optimisation of erosion control and soil conservation practices, particularly for the design of landscape reclamation works. The model is derived from the equations set up in the EuroSEM and WEPP models, simplified and adapted for usage through a spreadsheet in order to make a user friendly tool readily available for everyday design activities towards cost reduction. An application of the model using literature parameters in a real world case study is described, together with the identification of future lines of research oriented to the calibration of design parameters.

Premessa

Negli ultimi anni si è verificata una notevole diffusione delle tecniche di ingegneria naturalistica nei campi della difesa del suolo e del recupero ambientale, con particolare riferimento per la sistemazione dei versanti e la lotta all'erosione.
Benché l'esperienza in tali settori sia collaudata da anni di applicazioni, che spesso consentono di dimensionare gli interventi senza richiedere procedure formalizzate, è chiaro che in alcuni casi, nei quali le dimensioni degli interventi siano tali da comportare ingenti investimenti nelle sistemazioni naturalistiche, la possibilità di disporre di strumenti di supporto alle decisioni con cui ottimizzare gli interventi può risultare di fondamentale importanza per ridurre i costi senza modificare la qualità ed efficienza complessive del progetto.

La modellazione matematica dei fenomeni erosivi rimane un'attività complessa, benché già da tempo siano disponibili alcuni pacchetti software relativamente semplici da utilizzare, con i quali stimare la perdita di suolo, tanto alla scala del bacino idrografico e per singoli eventi (come nella maggior parte dei modelli fisicamente basati, quali EuroSEM (Morgan et al., 1998), KINEROS (Smith et al., 1995), ANSWERS (Beasley et al., 1980), WEPP (Alberts *et al.*, 1998)), quanto nel caso di singoli pendii e su base aggregata, p.es. annuale, con modelli semiempirici od empirici (come il modello di Morgan, Morgan e Finney, 1982, o la Universal Soil Loss Equation - USLE di Wischmeier e Smith, 1978, con le sue molteplici varianti di cui la più recente è la Revised USLE – RUSLE di Renard, 1997).

Questi modelli si distinguono per il fatto di richiedere una notevole mole di dati in ingresso e per la loro struttura "chiusa" che ne rende molto difficile l'applicazione in assenza di dati *site-specific*. L'utente, ricorrendo al software dedicato, difficilmente può modificare gli algoritmi di calcolo per renderli meglio rispondenti alle esigenze locali, ed inoltre è complesso e dispendioso l'uso di più modelli nello stesso caso di studio, in quanto spesso l'input di dati in un programma richiede tempo e conoscenza di dettaglio del software.
A prescindere dagli aspetti specificamente matematici legati alla modellazione, esistono ancora ampi margini di approfondimento sperimentale riguardo all'importanza relativa dei fenomeni coinvolti (p.es. Corradini *et al.*, 1994).
Allo stato attuale, si può affermare che modelli complessi, distribuiti e fisicamente basati, hanno maggiore interesse al livello della modellazione di dettaglio finalizzata alla progettazione, mentre al livello del bacino idrografico e per scopi di pianificazione si incontrano sempre più di frequente applicazioni di modelli semplici basati su indici topografici e su operazioni GIS (p.es. Mitasova et al., 1996; Desmet e Govers, 1996; Mitasova et al., 1997; De Jong et al., 1999; Renschler et al., 1999), che appaiono una alternativa promettente e molto vantaggiosa dal punto di vista economico, rispetto ai modelli citati, per prevedere i *pattern* di erosione e deposizione conseguenti alle dinamiche idrologiche alla scala del paesaggio, almeno nei termini comparativi della distribuzione spaziale e dell'intensità relativa dei fenomeni fra diversi siti dello stesso bacino (Pistocchi, 2001a,b). Per quanto riguarda invece la potenzialità di previsione quantitativa, che differenzia i modelli fisicamente basati da quelli semiempirici, è ancora da richiamare la fondamentale importanza delle misure e della calibrazione locale del modello, senza la quale anche gli approcci teoricamente più rigorosi non possono che fornire l'ordine di grandezza dei flussi solidi (Morgan, 1995).
In definitiva si può affermare che la modellistica fisicamente basata dei fenomeni erosivi ha una rilevanza ingegneristica allorché si tratta di prevedere le dinamiche alla scala del sito locale, mentre quando si passa alla scala del bacino idrografico è indispensabile partire dai dati di un monitoraggio di durata significativa se si intende calibrare un modello di previsione quantitativa, ed è invece sufficiente ricorrere a semplici modelli *GIS-based* se si ha il solo scopo di identificare il *pattern* delle zone in erosione e deposizione e l'intensità relativa dei fenomeni.
Per quanto riguarda invece i modelli di scala locale, si può ipotizzare che la maggiore semplicità delle situazioni, in fin dei conti riconducibili a un numero limitato di tipologie, permetta la definizione di valori-guida per i parametri di un modello previsionale che possano essere trasferiti con modesta perdita di affidabilità a situazioni diverse da quelle di calibrazione.

La ricerca qui presentata si è posta l'obiettivo di studiare strumenti previsionali per la valutazione delle perdite di suolo da singoli pendii, che siano:

- di semplice utilizzo e di elevata flessibilità (possibilità per l'utente di modificare le leggi di trasporto solido impiegate in modo da poter tenere conto di situazioni specifiche)
- completi nello sviluppo della concettualizzazione e descrizione matematica dei fenomeni fisici, in linea con quanto già disponibile allo stato dell'arte nella modellistica distribuita *physically based*
- orientati alla verifica di diverse ipotesi progettuali e al dimensionamento ottimale degli interventi di difesa dall'erosione (canalette rompi-pendio, viminate e gradonate, rivestimento, rivegetazione e copertura del terreno…)
- aperti a diverse modalità di calcolo della capacità di trasporto; in questo modo, l'utente si trova a poter stimare per lo stesso processo idrologico i flussi di sedimento secondo diverse leggi, dal cui confronto potrà emergere una valutazione più accurata rispetto a quella derivante da un singolo modello (p.es. Morgan et al ,1995).

Nel seguito si descrive l'implementazione di due modelli di trasporto solido alla scala della singola scarpata, basati sulla formulazione originale del modello WEPP (di moto permanente) e EuroSEM (di moto vario) opportunamente modificati per tenere conto della rilevanza dei soli eventi singoli di

precipitazione, piuttosto che di processi continui o temporalmente aggregati, e della presenza di dispositivi atti al contenimento della perdita di suolo (canalette, viminate, copertura del terreno).
L'implementazione è stata fatta su foglio elettronico in modo da consentire la massima flessibilità d'uso anche da parte di utenti non esperti di programmazione numerica. Questa scelta consente di inserire in futuro ogni altro algoritmo di calcolo del trasporto solido, senza modificare la struttura del foglio elettronico
Vengono descritti dapprima i modelli matematici di riferimento adottati, e successivamente le modalità di applicazione degli stessi al dimensionamento degli interventi di ingegneria naturalistica in un caso di studio significativo.
Infine, vengono delineate le prospettive di ricerca futura, orientate soprattutto alla verifica in campo e alla calibrazione dei modelli per la riproduzione di fenomeni finora relativamente poco studiati come quelli erosivi in ambito non agricolo, come sono appunto gli interventi di recupero ambientale.

Formulazione dei modelli

Un componente fondamentale di tutti i modelli di erosione fisicamente basati è quello che descrive il regime di flusso liquido sulle superficie soggette all'erosione. Il modello idraulico costituisce infatti l'ingresso fondamentale alle successive fasi di calcolo. Lo scopo di questo componente è di produrre l'andamento del tirante idrico e della velocità dell'acqua lungo il pendio. Date le caratteristiche del flusso, che presenta in tutti i casi di interesse applicativo tiranti idrici molto piccoli e correnti idrauliche supercritiche a causa delle elevate pendenze topografiche, è chiaro che il moto avviene in condizioni cinematiche, ovvero con fenomeni di laminazione delle portate pressoché trascurabili. Gli idrogrammi di piena in ingresso a monte della scarpata vengono trasferiti sulla stessa senza apprezzabile deformazione. In termini matematici, questo equivale ad assumere che nelle equazioni generali del moto vario delle correnti a superficie libera si possano trascurare i termini inerziali, e che si possano far coincidere i gradienti idraulici con quelli topografici.
Su una porzione di scarpata di larghezza unitaria, su cui defluisce da monte la portata q [$m^3 s^{-1} m^{-1}$] sotto l'azione di una pioggia di intensità effettiva i [m/s], vale nelle ipotesi dette l'equazione:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha\beta h^{\beta-1}\frac{\partial h}{\partial x} = i(x,t) \qquad (1)$$

ove:
- a e b sono i parametri della scala delle portate, che lega la portata liquida per unità di superficie al tirante idrico mediante una relazione del tipo:

$$q = a\, h^{b} \qquad (2)$$

- x [m] è la distanza percorsa lungo il pendio dalla sommità
- h [m] il tirante idraulico .

Il parametro a per sezione rettangolare larga vale $\frac{\sqrt{S}}{n}$, con S inclinazione della scarpata e n scabrezza secondo Manning [s m-1/3] , mentre è b= 5/3 (p. es. Marchi e Rubatta 1981).
Dopo avere risolto il problema della determinazione delle grandezze idrauliche si deve valutare l'erosione lungo il pendio, e in particolare l'andamento delle concentrazioni di sedimento eroso.Il modello qui presentato utilizza a questo scopo due formulazioni : l'algoritmo del modello EuroSEM (cit.) e quello del WEPP (cit.).

Modello EuroSEM

Il primo dei due modelli si basa sulla risoluzione dell'equazione di continuità dei sedimenti trasportati nella forma:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t}+\frac{\partial(QC)}{\partial x}=e(x,t)+q_s(x,t) \qquad (3)$$

Dove C è la concentrazione di sedimenti [m^3/ m^3], A l'area bagnata [m^2], Q la portata liquida fluente da monte [m^3/s], e(x,t) il tasso netto di distacco (o deposizione) di sedimenti per unità di lunghezza del percorso [m^3 $s^{-1}cm^{-1}$], $q_s(x,t)$ la portata solida laterale [m^3 $s^{-1}cm^{-1}$], x la distanza percorsa lungo la direzione principale del moto [m] e t il tempo [s]. La portata solida Q_s[Kg/s] in un punto della scarpata è calcolata come prodotto della portata liquida Q per la concentrazione C e per il peso specifico dei sedimenti r_s [Kg/m^3].
La geometria di deflusso qui esaminata è quella più semplice, che consiste in un flusso diretto lungo la linea di massima pendenza della scarpata intesa come superficie " piana ", in assenza di rills in cui incanalarlo e isolando una porzione di pendio di larghezza B pari ad 1m . In questo caso semplificato l'apporto laterale q_s può essere considerato nullo .
Il termine e(x,t) è la somma di due contributi:

$$e(x,t)=DET\ (x,t) + DF(x,t) \qquad (4)$$

DET esprime la capacità di distacco di terreno ad opera della pioggia, mentre DF quella dovuta all'azione di trascinamento del deflusso superficiale, stimati secondo le seguenti equazioni (Morgan *et al.*, 1998):

$$DET= k \cdot (KE)\cdot e^{-2h} \qquad (5)$$

essendo k[g/J] la distaccabilità del suolo sotto l'azione della pioggia, KE energia cinetica totale della pioggia [J/m^2] e h tirante idraulico [m]. KE è legato all'intensità di pioggia i [mm/hr] (nel caso di suolo senza vegetazione) e anche all'altezza della copertura vegetale PH [m] (per suolo coperto da piante ad alto fusto) alle relazioni :

$$KE = [8.95 + (8.44 \log(i))]\cdot i \qquad (6.1) \qquad\qquad KE= [(15.8\ PH^{0.5}) - 5.87)\ ] \cdot i \qquad (6.2)$$

mentre DF è dato da :

$$DF= b\cdot B\cdot v_s\cdot (T - C) \qquad (7)$$

con b efficienza del distacco , pari a 1 se C > T (nel qual caso si verifica deposito di materiale) , altrimenti calcolata come $b= 0.79 \cdot e^{-0.85\ J}$ con J coesione del terreno misurata con scissometro Torvane [kPa]; T è la capacità di trasporto [m^3/ m^3] legata alla potenza idraulica unitaria della corrente, w [cm / s], che dipende da velocità media del fluido U e pendenza del fondo S ,secondo le relazioni:

$$w = US \qquad (8)$$

$$T= a\cdot (w - w_c)^b \qquad (9)$$

Dove a e b sono coefficienti stimati in base al d_{50} [mm] del terreno , w_c è il valore critico per l'inizio del distacco e v_s è la velocità di sedimentazione delle particelle che in moto turbolento è fornita dalla relazione (Mannaerts, 2000) :

$$v_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_s - \rho_w)d_{50}}{3\cdot 0{,}18\rho_w}} \qquad \underline{(9b)}$$

Dove g è l'accelerazione di gravità pari a 9.81 [m/s^2] , d_{50} il diametro medio delle particelle di suolo[m], r_s e r_w le densità dei sedimenti e dell'acqua [kg/m^3].

Modello WEPP

Il modello WEPP si basa sulla soluzione dell'equazione (3) in forma stazionaria :

$$\frac{dQ_s}{dx} = D_i + D_r \qquad (10)$$

Esso schematizza il fenomeno erosivo (nel caso più semplice qui esposto) come un distacco di materiale dovuto all'azione della pioggia , trasferito poi nei *rills* che si formano sulla superficie e quindi trascinato a valle, insieme a quello distaccato all'interno dei *rills* stessi dall'azione tangenziale della corrente. Q_s è la portata solida di sedimenti [Kg $s^{-1}m^{-1}$] , D_i il tasso di distacco di sedimenti dovuto all'azione della pioggia e D_r quello dovuto all'azione tangenziale del fluido nei *rills* . D_i è legato all'intensità di pioggia i [m/s] dalla relazione:

$$D_i = K_i\, i^2\, C \qquad (11)$$

Con K_i [kg s m^{-4}] distaccabilità delle particelle di suolo sotto l'azione della pioggia, data in funzione del tenore di argilla, sabbia e materiale organico del suolo e C un fattore correttivo che dipende da altre caratteristiche del suolo (quali peso specifico, rugosità superficiale o operazioni colturali eseguite).

D_f è invece fornito dall'equazione:

$$D_f = K_r(\tau - \tau_c)(1-Q_s/T) \qquad (12)$$

Con Kr parametro di distaccabilità definito similmente a Ki in funzione delle caratteristiche del suolo (Alberts *et al.*, 1998), τ [kPa] azione tangenziale efficace della corrente al fondo, τ_c valore critico a cui ha inizio il distacco, calcolato in base alle caratteristiche del suolo, T capacità di trasporto [Kg $s^{-1}m^{-1}$] valutata come:

$$T = K_t\, \tau^{3/2} \qquad (13)$$

Dove K_t è un coefficiente di trasporto stimabile in base alle caratteristiche del terreno (è importante notare come tali caratteristiche varino anche in funzione di fenomeni quali il congelamento o l'essiccamento superficiale, trascurati , come nella presente implementazione, in casi in cui si esaminano gli effetti del singolo evento di pioggia intensa , su brevi scale temporali).

La geometria semplificata presa in esame consiste in un pendio con un *rill* per ogni metro di larghezza , schematizzato come un piccolo canale rettangolare di larghezza w, legata alla portata in ingresso Qe [m^3 /s] nel *rill* dalla relazione empirica (Gilley e Weltz, 1998):

$$w = 1{,}13 Q_e^{0{,}303} \qquad (14)$$

Il modello qui presentato lavora su di una base di calcolo costituita da una porzione si scarpata di larghezza B che contiene 1 m di larghezza di *rill*.

Implementazione su foglio elettronico

I modelli sono stati implementati risolvendone le equazioni su foglio di calcolo con schema esplicito alle differenze finite per passi temporali e spaziali Δt e Δx. In particolare per il modello EuroSEM si è proceduto per prima cosa alla propagazione lungo il pendio di un'onda di piena Q nota in ingresso alla scarpata. Tale portata può essere valutata ad esempio supponendo un idrogramma di piena di forma triangolare (cosa sempre accettabile, viste le limitate estensioni dei bacini a monte delle scarpate e quindi la plausibilità di onde di piena simmetriche) di durata pari a due volte tempo di corrivazione t_c del bacino , portata di picco Q_p in corrispondenza di t_c e intensità di pioggia critica i relativa allo stesso tempo di corrivazione. Risolvendo la (1) per passi di tempo Δt dell'ordine di 1 s e Δx di 0.5-1 m si ottiene l'andamento dei tiranti idraulici h[x,t] lungo la scarpata, in particolare l'andamento della portata in uscita dal pendio di larghezza B data da $Q_u(t) = a\, h_u^{\,b} \cdot B$ [m^3/s]. Utilizzando questi ultimi come ingresso al modello di erosione dato dalla (3) e risolvendolo per gli stessi passi Δt e Δx si ottiene la distribuzione delle concentrazioni di sedimento trasportato lungo la scarpata C(x,t)[m^3/ m^3]. L'integrazione nel tempo durante l'evento fornisce la stima dei Kg di suolo erosi o sedimentati.

L'andamento della portata solida erosa dal pendio, nel corso dell'evento considerato ,Qs(t) [Kg/s] è dato dal prodotto della $C_u(t)$ relativa al tratto lungo Δx al piede della scarpata per la portata idraulica $Q_u(t)$ [m^3/s] in uscita e per il peso specifico dei sedimenti ρ_s [Kg/m^3].

Nei grafici seguenti è mostrato un esempio di andamento dei tiranti idrici h(x,t)[m] (

Figura 1) e delle concentrazioni di sedimento C(x,t)[m] (Figura 2) lungo una scarpata-tipo, la cui sezione rappresentativa lungo la linea di massima pendenza si estende per una lunghezza orizzontale di 13 m, con pendenza media di 40° e punte di 70° circa a metà pendio.

Figura 1

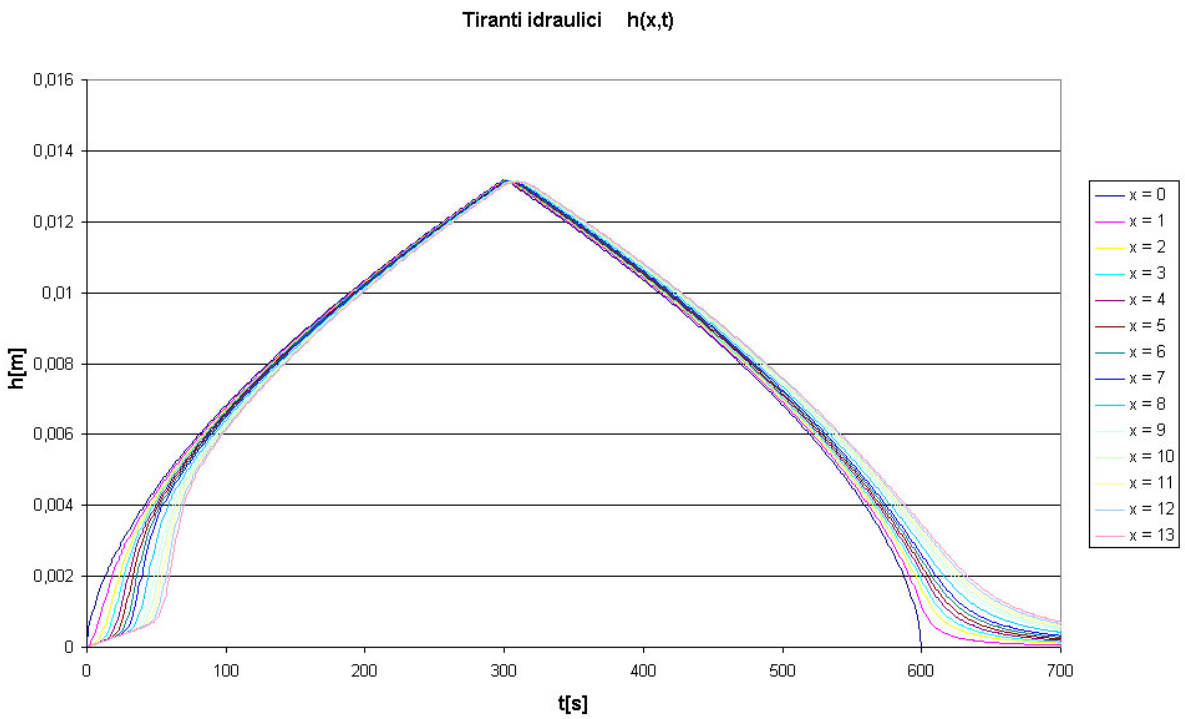
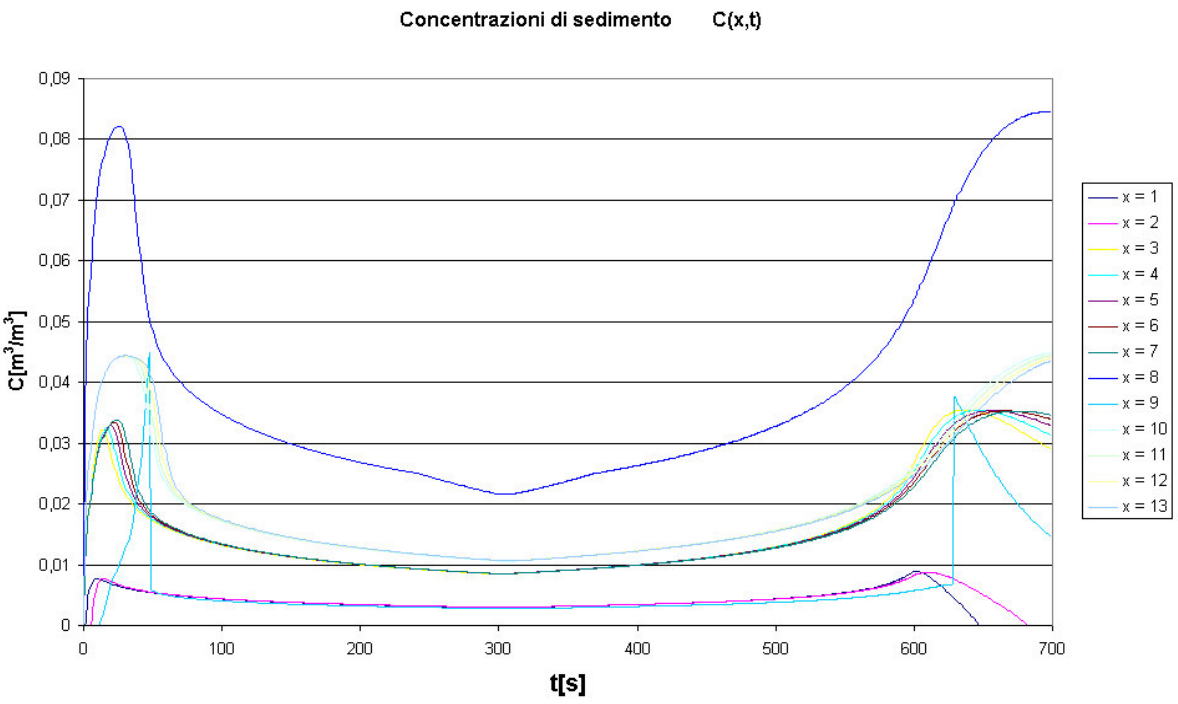


Figura 2



Nel modello WEPP la risoluzione della (1) in caso stazionario è del tutto analoga a quanto già esposto, ma risulta estremamente più semplice dal momento che si eliminano i termini di variabilità temporale. Per considerare la stazionarietà il modello richiede una portata in ingresso al pendio costante e pari alla portata di picco Qp per una durata equivalente d tale che il volume di piena sia lo stesso dell'idrogramma reale. Nel caso di idrogramma triangolare visto sopra tale durata è il tempo di corrivazione t_c. Risolvendo quindi alle differenze finite l'equazione (10) si ottiene l'andamento delle concentrazioni C(x) [Kg/m^3] lungo la scarpata e la portata solida in uscita come prodotto di C e Q relative al concio Dx al piede del pendio. Le figure seguenti illustrano l'andamento dei tiranti idraulici h(x) [m] (Figura 3)e delle concentrazioni di sedimento C(x) [Kg/m^3] (Figura 4) lungo il pendio-tipo precedentemente descritto.

Figura 3

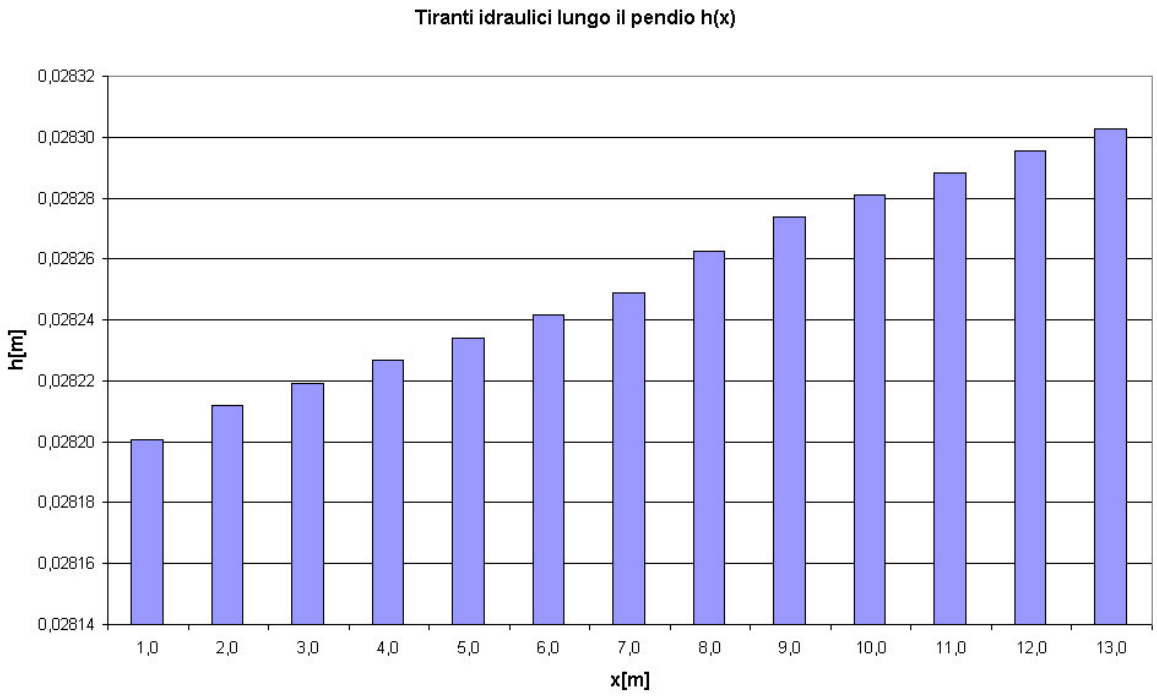
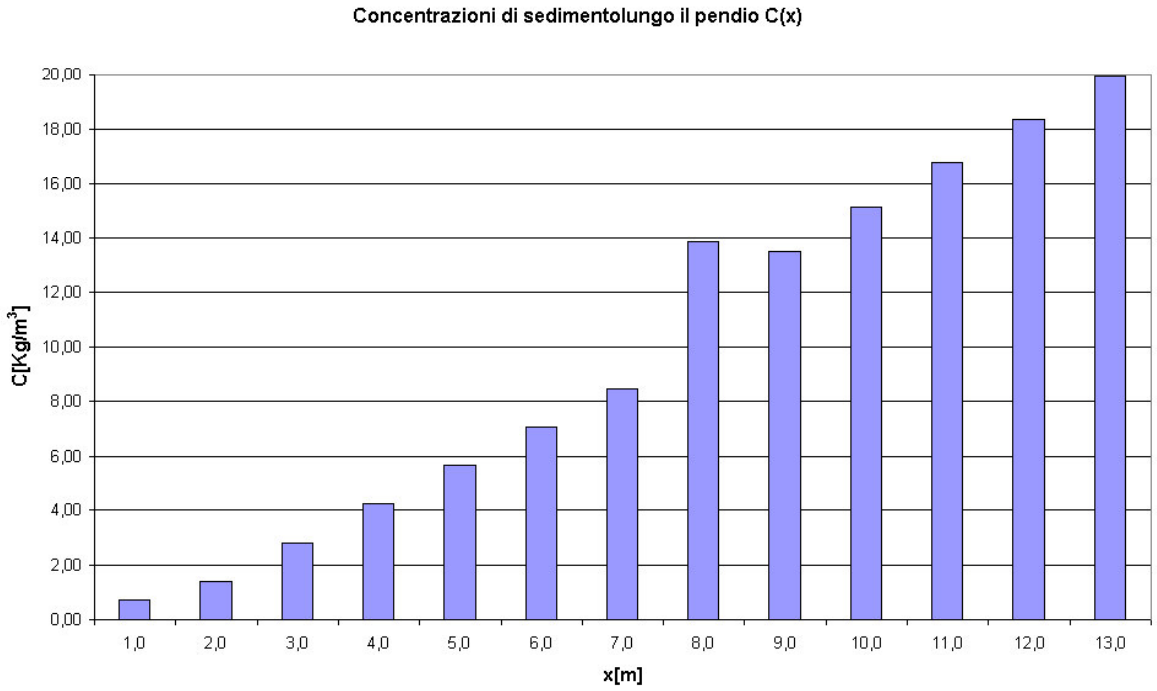


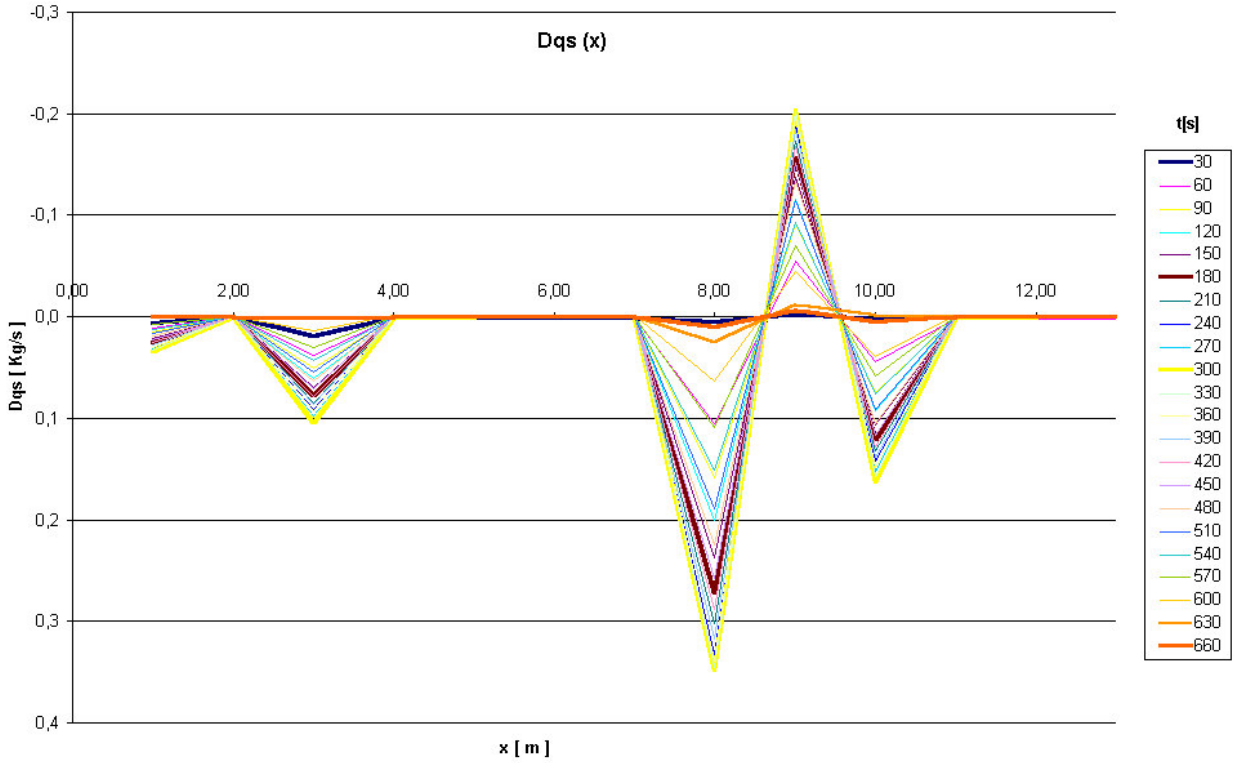
Figura 4



Per entrambi i modelli è stata poi calcolata la variazione di portata solida tra due tratti successivi Δx, $\Delta Q_s = Q_{s\,i+1} - Q_{s\,i}$, per evidenziare i tratti di scavo ($\Delta Q_s > 0$) e di deposito ($\Delta Q_s < 0$) lungo il

pendio. Una componente fondamentale del calcolo è quella che serve a stimare l'efficacia dei diversi tipi di intervento. L'utilizzo del modello EuroSEM che considera la variabilità spazio-temporale delle grandezze in gioco permette in particolare di seguire l'andamento nel tempo , oltre che lungo il pendio, della sequenza erosivo-deposizionale , come illustra il grafico $DQ_s(x,t)$ (Figura 5) sempre relativo alla scarpata-tipo .

Figura 5



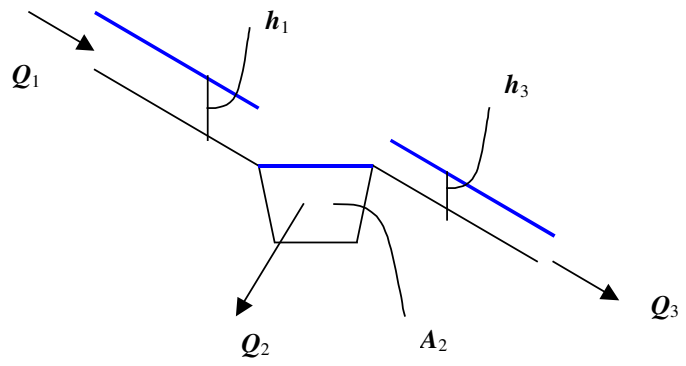
Per simulare la presenza di viminate lungo la scarpata è stata inserita la possibilità di assegnare per ogni concio Dx il numero di viminate per metro e l'altezza h delle viminate (normalmente, circa 30 cm fuori terra). Analogamente possono essere modellizzate le canalette trasversali al pendio, allo scopo di drenare parte del deflusso superficiale verso un recapito a valle . Inserendo per un generico concio Dx una canaletta, e i parametri idraulici della stessa (forma, scabrezza e pendenza di fondo) essa comporta una diminuzione del tirante idraulico immediatamente a valle, valutato calcolando la portata drenata dalla canaletta e propagando il rimanente lungo il pendio con le equazioni già utilizzate per il modello cinematico. Similmente si possono valutare gli effetti in termini di drenaggio delle viminate, secondo un funzionamento simile, anche se meno efficace , a quello delle canalette vere e proprie .

Per la simulazione delle canalette, si è ipotizzato che fosse applicabile uno schema idraulico per cui la canaletta, supposta di forma trapezia e di cui occorre assegnare dimensioni, pendenza e scabrezza, drena tutta la portata proveniente da monte fino a quando non raggiunge il suo massimo riempimento, dopo di che la portata in eccesso da monte continua ad essere propagata verso valle.

Per la simulazione dell'effetto analogo di sgrondamento operato dalle viminate, si è supposto che il flusso venga ripartito, in corrispondenza di ogni viminata, fra due tronchi idraulici in parallelo, dei quali uno rappresenta il pendio a valle della viminata e l'altro il canalicolo individuato dalla linea della viminata. La portata viene ripartita con legge di moto uniforme fra i due tronchi in ragione della resistenza idraulica, la quale, supposto che la scabrezza lungo la viminata e lungo il pendio sia

costante, dipende solo dalla pendenza e dalla larghezza dei due tronchi. Il canalicolo costituito dalla sommità della viminata viene così compiutamente descritto con la sola larghezza e pendenza trasversale al pendio. L'introduzione delle viminate viene anche valutata in termini di riduzione di pendenza, che però in genere è trascurabile rispetto allo sgrondamento (riduzione della lunghezza del pendio) ai fini dell'erosione. Nelle figure seguenti è mostrato lo schema di drenaggio ipotizzato rispettivamente per le canalette (Figura 6) e le viminate (Figura 7), con le equazioni utilizzate per il calcolo del tirante idrico h_3 subito a valle di tali opere. I valori a e b si riferiscono al pendio di inclinazione media(per le ragioni più avanti illustrate), S_2 e n_2 rappresentano pendenza e scabrezza trasversali , A_2 e R_2 area bagnata e raggio idraulico della canaletta nelle condizioni di massimo riempimento, B_2 la larghezza del canalicolo che si forma per effetto della viminata.

Figura 6



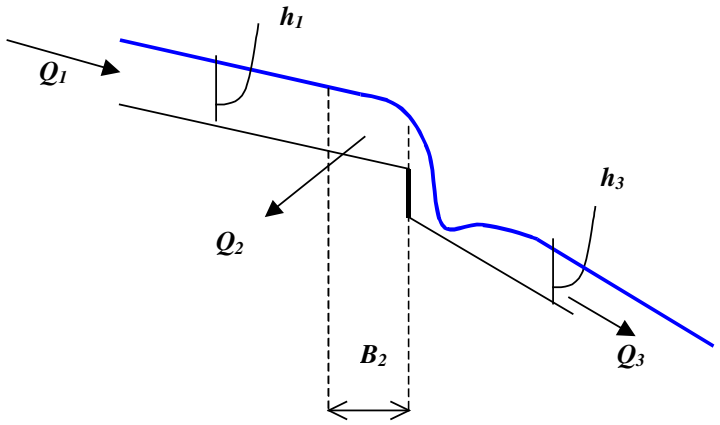
$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

$$Q_1 = \alpha \cdot h_1^{\beta}$$

$$Q_3 = \alpha \cdot h_3^{\beta}$$

$$Q_{2\max} = A_2 \cdot R_2^{2/3} \cdot \frac{\sqrt{S_2}}{n_2}$$

Figura 7



$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

$$Q_1 = \alpha \cdot h_1^{\beta}$$

$$Q_3 = \alpha \cdot h_3^{\beta}$$

$$Q_2 = B_2 \cdot h_1^{5/3} \cdot \frac{\sqrt{S_2}}{n_2}$$

Ulteriori interventi di sistemazione con tecniche quali *mulching* , nero-verde *sensu* Schiechtl (si veda p.es. Regione Emilia Romagna e Regione Veneto, 1993; Benini, 1990), georeti, geogriglie e altri geotessili possono essere simulati variando opportunamente i parametri di scabrezza n di Manning [s $m^{-1/3}$], coesione superficiale J[kPa], percentuali di materiale organico e tenore di radici nei primi 10 cm di suolo [kg/m^2], rugosità superficiale R[m] che compare nelle espressioni che gli Autori propongono per valutare i coefficienti K_i e K_r che si trovano nella (11) e (12). Per gli interventi di rivegetazione , ad esempio attraverso pratiche di idrosemina, è inoltre necessario variare le percentuali di suolo ricoperte da vegetazione ed eventualmente il parametro di altezza

della vegetazione PH[m] .Tali variazioni possono essere specificate per ogni tronco di lunghezza Dx lungo la scarpata.

Accorgimenti modellistici e sensitivity rispetto ai parametri

Nel valutare l'andamento dei tiranti idraulici h(x,t) lungo la scarpata, particolare attenzione è stata posta nel fissare le condizioni al contorno e iniziali.
Data la particolare condizione del pendio su cui si integrano le equazioni, ed in particolare forti gradienti topografici che esaltano gli effetti numerici di non-conservazione della massa, si è subito riscontrato che la soluzione dell'equazione (1) fornisce valori ragionevoli dei tiranti idrici, e garantisce con buona accuratezza la conservazione del bilancio di massa, a condizione che si utilizzi per la scala delle portate in ciascun punto il valore medio del parametro a valutato su tutto il pendio. Questo vale solo nel passaggio dal tirante idrico alla portata, mentre la soluzione della (1) in termini di tirante idrico si ottiene correttamente considerando a variabile con pendenza e scabrezza locali.
Gli elevati gradienti topografici sono anche responsabili del mancato rispetto del bilancio di massa del sedimento, come si avrà modo di illustrare dettagliatamente nel seguito.
Risolvendo le equazioni (1) e (2) con uno schema esplicito è stato poi necessario, per la stabilità numerica , verificare il rispetto de vincolo di Courant (p.es. Maione, 1995; Marchi e Rubatta, 1981) che impone una scelta dei passi Dt e Dx tale che :

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{U + \sqrt{gh}} \tag{15}$$

con U e h velocità e tirante idraulico massimi nel tratto Dx .
Il debole effetto di laminazione riscontrato (viste anche le alte pendenze in gioco nelle scarpate) consente di trascurare, sia nel modello idraulico che erosivo, la variazione di portata $\frac{\partial q}{\partial x}$ lungo il pendio e i relativi termini nella formulazione a differenze finite permettendo una semplificazione dei calcoli. La cosa è stata verificata con alcuni esperimenti numerici ed è del resto facilmente comprensibile.

Nell'implementazione del modello EuroSEM l'utilizzo di espressioni semplici per valutare la capacità di trasporto T, i cui parametri disponibili in letteratura (Morgan *et al.*, cit.) sono stati tarati su pendii più deboli di quelli in esame e per diametri d_{50} variabili da limo (*silt*) a sabbia grossolana (*coarse sand*), introduce incertezze sui limiti da applicare al valore massimo che T può raggiungere (teoricamente pari a 1, cioè il 100% di concentrazione dei sedimenti, che però è un limite senza significato fisico; nella realtà è problematico stabilire fino a quali ordini di grandezza della concentrazione questo tipo di modelli ha ancora significato, e quando si entri invece nel complesso ambito idrodinamico del *debris flow* – si veda p.es. Da Deppo *et al.*, 1997). Data la natura esplorativa dello studio, si rinvia comunque ad una fase di sperimentazione di campagna una calibrazione dei parametri delle relazioni empiriche più appropriata per le condizioni di riferimento.

Le condizioni al contorno per l'integrazione della (3) e della (10) sono fornite dalla concentrazione iniziale

$$C(0,t) = C(x,0)=DET/(q + v_s) \tag{16}$$

legata alla presenza di sedimenti distaccati dalla pioggia prima dell'inizio del deflusso superficiale.
Il modello WEPP considera l'azione tangenziale della corrente sul terreno in termini di tensioni di taglio efficaci, che sono in generale minori di quelle teoriche t=g h S (con g peso specifico dell'acqua h tirante idraulico e S pendenza topografica) derivanti dal bilancio delle forze sul volume elementare del fluido. Nell'individuare la quota di tensione t[kPa] che agisce sul terreno, si sono

utilizzate espressioni semplificate rispetto a quella originale del modello, riferendosi ai valori della scabrezza di Manning n per suolo privo di rugosità superficiali e vegetazione (n_b) e suolo che contempla tali effetti (n), secondo la relazione:

$$\tau_{eff} = \gamma\, h\, S\, (n_b/n)^{0.9} \qquad (17)$$

Pur potendosi riferire ai valori guida della scabrezza per diverse condizioni del suolo, p.es. in Morgan *et al.*, cit., si ritiene opportuno approfondire in studi sperimentali futuri i limiti di validità della (17) ed eventuali sue modifiche.

I modelli implementati con questi accorgimenti risultano sensibili in maniera differente ai diversi parametri in ingresso. Vincolata la scelta dei passi Δt e Δx al rispetto della relazione di Courant, nel modello EuroSEM le quantità erose aumentano decisamente al calare della scabrezza *n* di Manning (e al conseguente aumento della velocità della corrente), sulla cui determinazione (per i diversi tipi e utilizzi di suolo) la letteratura disponibile è piuttosto ricca (si veda al proposito la sintesi contenuta in Morgan *et al.*, cit.).

L'erosione cresce al calare della coesione superficiale J, e all'aumentare dei valori di portata in ingresso Q e della pendenza media della scarpata, mentre influenza minore è esercitata dalla distaccabilità sotto l'azione della pioggia, k , vista la predominanza nei casi esaminati dell'effetto di trasporto legato al deflusso superficiale. Un aspetto comunque fondamentale della modellazione è la corretta caratterizzazione geotecnica-pedologica del suolo, sia in termini di granulometrie, sia in termini di resistenza al taglio, densità, ecc. I parametri relativi al tipo di suolo possono condizionare pesantemente, se non il *pattern* di distribuzione dell'erosione e della rideposizione lungo il pendio, certamente il valore assoluto della produzione di sedimento dal pendio.

In ogni modo, si ritiene necessario condurre opportuni esperimenti di verifica dei parametri proposti in letteratura e di eventuale loro nuova definizione, visto il contesto di studio che risulta molto diverso da quello, meglio conosciuto, dell'erosione da zone agricole.

Nella vastità di parametri che, anche nella implementazione semplificata qui discussa, costituiscono l'ingresso al modello WEPP, l'erosione cresce sensibilmente al calare della scabrezza n di Manning e del valore di rugosità superficiale (che influenza direttamente la tensione tangenziale critica per il distacco, τ_c) e al crescere dei valori di portata Q e pendenza media S , mentre cala all'aumentare della densità dei sedimenti e del diametro medio d_{50} delle particelle.

Il modello richiede in ingresso l'analisi della composizione del terreno, e l'erosione aumenta con più alto è il tenore percentuale di sabbie , mentre cala all'aumentare del tenore si argille e radici nel terreno (che influenzano positivamente la coesione) e materiale organico.

Un peso inferiore è giocato dalla copertura vegetale arbustiva ed arborea, che influenza essenzialmente l'erosione ad opera della pioggia (per *splash detachment*), assai meno influente, come già evidenziato, rispetto all'azione idraulica della corrente nei casi di interesse applicativo qui considerati.

Le considerazioni ora espresse valgono per pendii di modeste dimensioni (qualche decina di metri di lunghezza) mentre possono essere smentite in situazioni di maggiore complessità idrografica.

Applicazione al caso del Rio Busca

Per valutare il comportamento dei modelli si sono utilizzati i dati provenienti da un certo numero di scarpate oggetto di progettazione ai fini del recupero ambientale nella zona del Rio Busca (presso Cesena). Il progetto si pone il fine di ripristinare le condizioni delle scarpate versanti sulla strada di accesso ad una discarica per RSU. Trattandosi di un numero elevato di scarpate, il costo a priori degli interventi di ingegneria naturalistica rappresenta comunque una voce non trascurabile. Considerando che i costi unitari delle opere standard di protezione antierosiva (come le viminate e i rivestimenti in geostuoie) sono piuttosto elevati, assume interesse l'ottimizzazione del progetto rispetto ai parametri dimensionali cautelativi che si incontrano nella letteratura corrente (p.es.

Regione Emilia Romagna e Regione Veneto, cit.). Per una prima valutazione in tal senso, si è proceduto all'applicazione del modello proposto come sistema di supporto alle decisioni. In mancanza di indagini più accurate i dati in ingresso sono stati valutati a partire dalle relazioni geologiche disponibili sull'area e dai sopralluoghi effettuati; il quadro complessivo è quello di una sostanziale uniformità nella composizione dei terreni, sabbioso argillosi, in assenza di copertura vegetale (e quindi basso contenuto organico, dell'ordine dell'1.5%) e con elevata rugosità superficiale. La densità media dell'aggregato di particelle che costituisce il suolo è stata valutata in 1900 Kg/ m^3, a fronte di un diametro medio d_{50} di 0.1 mm . In base alle indicazioni di letteratura (Morgan *et al.*, cit.) è stata stimata la scabrezza n di Manning pari a 0.05, e gli altri parametri necessari (in particolare la coesione superficiale, stimata in 6 kPa, e i tenori di sabbie e argille, valutati in 30% e 15% rispettivamente)

Ciò che maggiormente differenzia le diverse scarpate esaminate è l'andamento medio del pendio, con una buona variabilità di casi, dalle scarpate a relativamente bassa pendenza (10-15 °) e estensione dell'ordine dei 50 m, a pendii assai più ripidi (al limite 70°), con lunghezze ridotte e bruschi cambi di pendenza. Alla pioggia "di progetto" in ingresso è stata assegnata un'intensità media di 50 mm/h, con un tempo di corrivazione del bacino drenato da monte da ciascuna scarpata Tc=5' = 300 s e una portata al colmo in ingresso di 10 l/s per ogni metro di larghezza del pendio. L'idrogramma di portata è stato assunto triangolare di tempo di base pari a Tb=2*Tc=600 s. La sezione idraulica di deflusso su ogni scarpata è stata assunta come idraulicamente larghissima (raggio idraulico coincidente con il tirante idrico).

Per le diverse scarpate in esame la simulazione ha prodotto stime dell'erosione, nel corso dell'evento di piena, che vanno dalle 10 alle 70 t/ha per le scarpate con pendenze medie tra 10° e 50°, con punte dell'ordine delle 170 t /ha per la scarpata più ripida in assoluto (65° di pendenza media). Le stime condotte hanno un senso fisico compatibile con i dati di letteratura riguardo alla perdita di suolo agrario da singolo campo (p.es. Chisci, 1986) ed a studi recenti (ERSO, 1990) che propongono per l'area di studio tassi di erosione (stimati con la USLE localmente validata) da diverse decine a qualche centinaio di t/ha anno. Occorre poi considerare che l'evento di progetto utilizzato è piuttosto gravoso (elevati tempi di ritorno, dell'ordine dei 50-100 anni) e che è noto che nei climi europei oltre l'80% dell'erosione totale annua è spiegato da 4-5 eventi intensi durante l'anno (Morgan et al., 1998).

Ad ogni modo, come si è già avuto modo di richiamare, l'accettazione dei valori assoluti delle portate solide previste dal modello è subordinata ad una calibrazione sul campo che rappresenta lo sviluppo futuro della ricerca.

La pendenza non è l'unico fattore determinante nel calcolo dell'erosione: parametri quali scabrezza, diametro medio dei sedimenti , composizione del suolo e coesione del materiale sono altrettanto determinanti.

Come già evidenziato l'applicazione dei modelli non è finalizzata tanto alla valutazione dell'entità esatta dell'erosione (che pure, come ora richiamato, rientra negli ordini di grandezza dei fenomeni analoghi osservati in Emilia Romagna) quanto nella stima degli effetti che diversi interventi di sistemazione producono sul pendio . In questa ottica viene qui riportato un esempio di applicazione ad una delle scarpate, risistemate con interventi di ingegneria naturalistica.

La scarpata in questione si estende per una lunghezza orizzontale di 13 m , con pendenza media di 40° e punte di 70° circa a metà pendio. La simulazione condotta senza alcun intervento ha prodotto una valutazione del fenomeno erosivo di 60 Kg/m (40 t/ha) per l'evento meteorico sopra considerato, di cui si è rimarcato il carattere di evento "estremo".

Per gli interventi di risistemazione la scelta è caduta su rivestimenti di georeti accoppiate ad idrosemina lungo quasi tutto il profilo della scarpata, con l'inserimento di arbusti (1 m di altezza) in due distinte posizioni lungo la scarpata e di una viminata (altezza 30 cm) opportunamente posizionata in un tratto a elevata pendenza. Gli interventi sono stati simulati sia attraverso la descrizione degli effetti idrodinamici delle viminate, come precedentemente descritti, sia modificando i parametri descriventi le proprietà del terreno e in particolare:

- le scabrezze (da 0.05 a 0.08 s $m^{-1/3}$ per le zone idroseminate e 0.15 s $m^{-1/3}$ per le zone coperte da arbusti)
- le rugosità superficiali(di circa 4 cm)
- la coesione (di 4 kPa)
- il tenore di radici e materiale organico nel suolo(saliti da 0.02 a 0.8 Kg/m^2 e da 1.5 a 3%),

per citare i parametri più significativi. Al proposito si sottolinea che questi parametri sono assai rilevanti ai fini della quantificazione degli effetti, ma spesso non esistono indicazioni sufficientemente precise in letteratura riguardo a loro valori attendibili in corrispondenza di diverse modalità di copertura e gestione dei suoli. Le variazioni imposte ai fini del presente caso di studio sono state valutate in termini del tutto esplorativi e servono solo a dare una prima idea dei possibili effetti di interventi progettuali ipotizzati.
La sistemazione antierosiva di progetto produrrebbe, secondo la simulazione condotta , un notevole decremento delle perdite di suolo, tra l'87 e il 97 % (a seconda del modello utilizzato, da WEPP a EuroSEM); il risultato è stato confrontato con quanto ipotizzabile a seguito di diversi interventi alternativi quali ad esempio viminate diffuse, nei tratti a maggior pendenza, a passo di 2 metri(con abbattimento del 30 e 22 % secondo WEPP e EuroSEM) o di 1 metro (65 e 50%).
Ipotizzando infine di rivestire la scarpata solo con georeti accoppiate ad idrosemina unicamente nei punti che, secondo la simulazione iniziale, risultano maggiormente soggetti ad erosione, l'abbattimento si attesta tra il 40 e il 10%, con un sostanziale spostamento dell'erosione nei tratti non protetti. Le figure seguenti (Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11) mostrano l'andamento dell'erosione e deposizione lungo il profilo del pendio in corrispondenza dello stato attuale e delle diverse ipotesi di sistemazione.

Figura 8

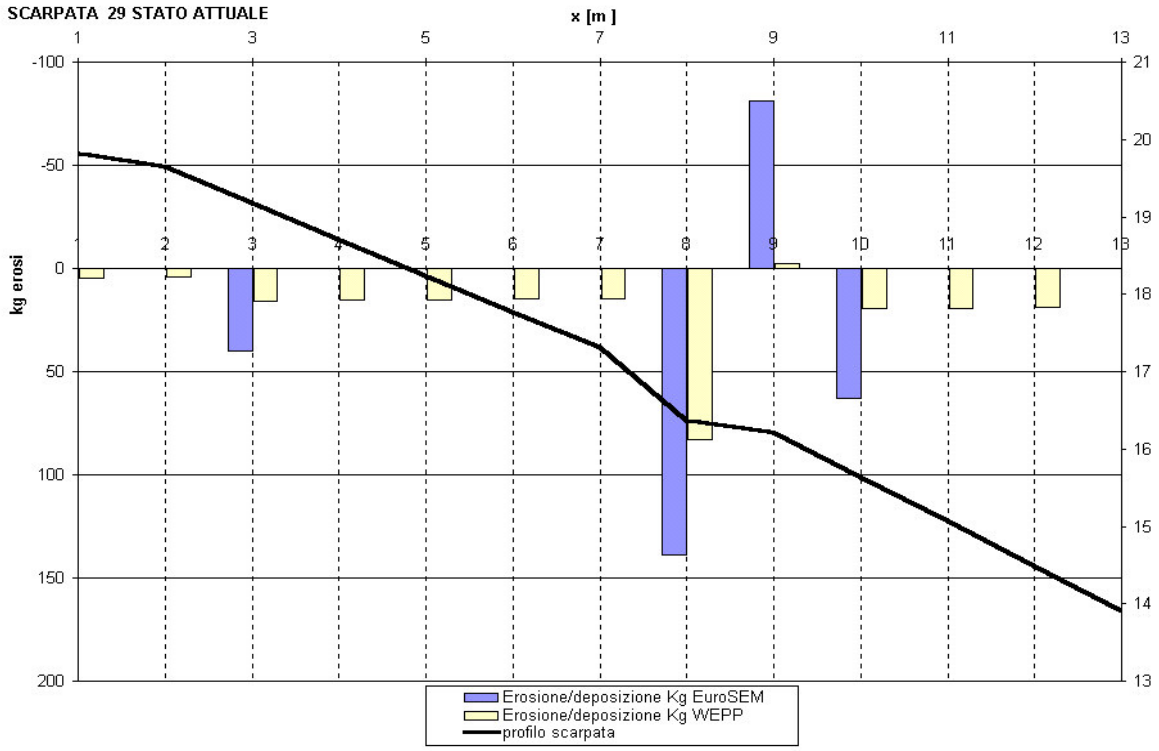


Figura 9

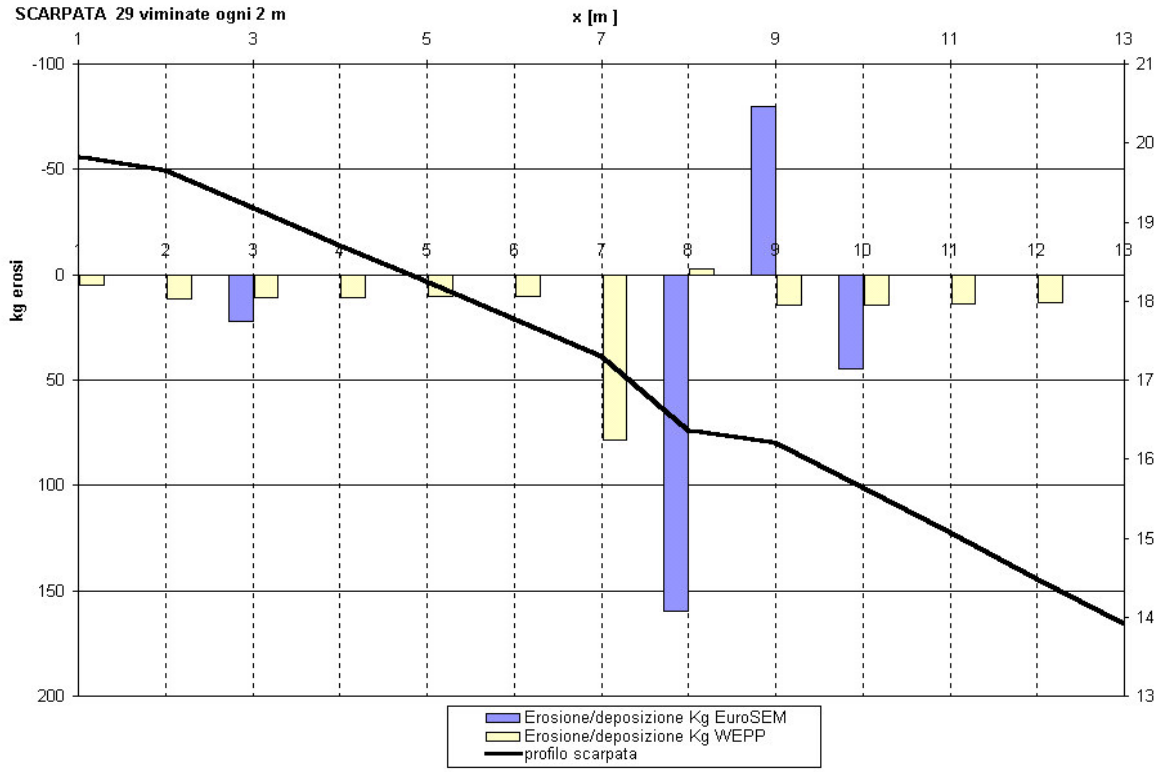


Figura 10

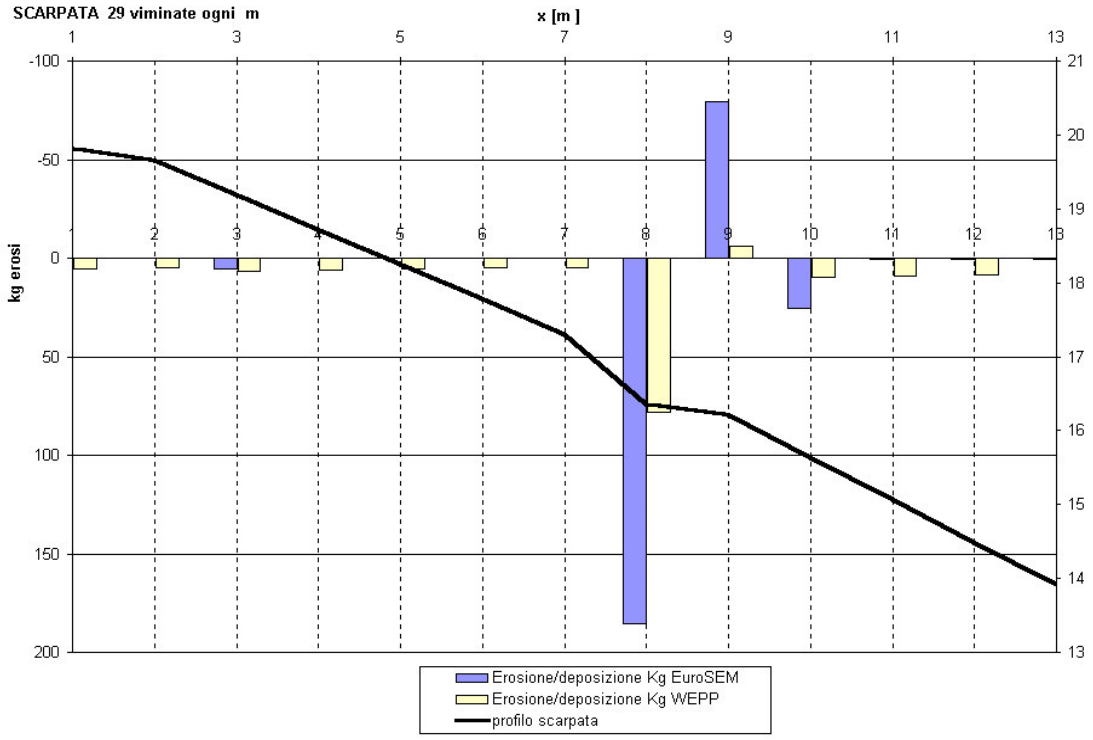
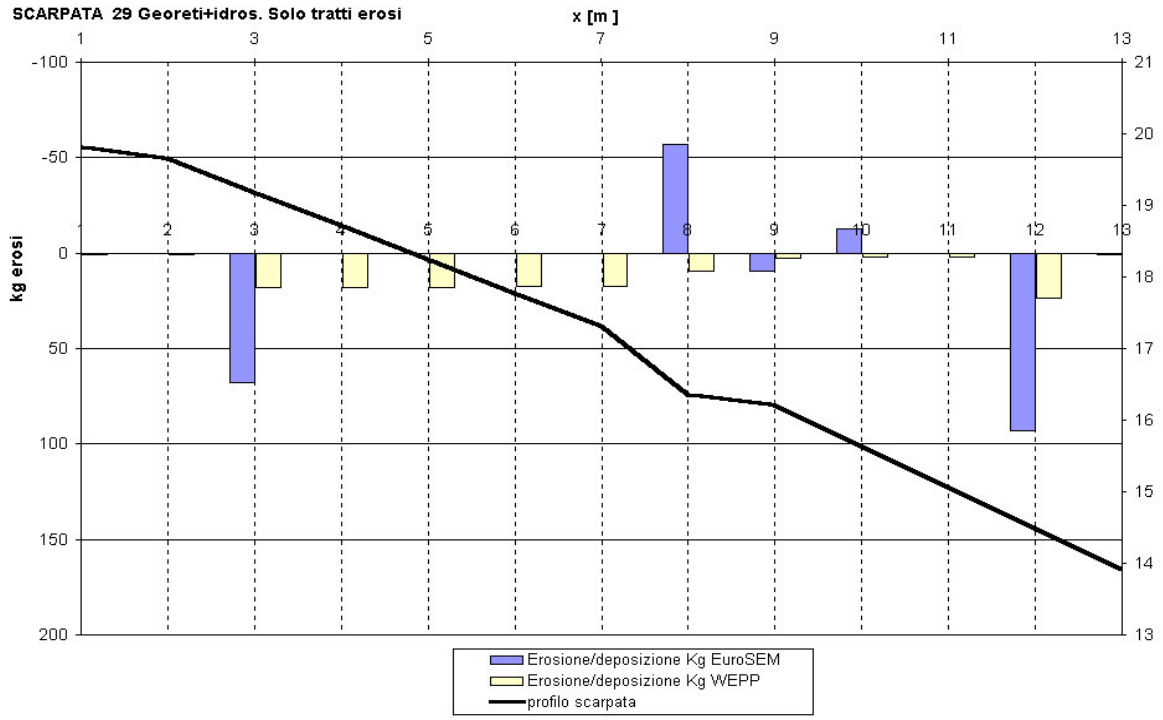


Figura 11



Conclusioni e linee future di ricerca

La modellistica messa a punto appare promettente come strumento di supporto alla progettazione in quanto la simulazione fisicamente basata delle scarpate permette l'ottimizzazione degli interventi, con i conseguenti vantaggi di tipo tecnico-economico. Allo stato attuale, occorre riconoscere che il valore delle previsioni modellistiche è essenzialmente comparativo, dovendo assegnare molti dei parametri richiesti senza una precisa conoscenza dei medesimi, soprattutto a causa del fatto che i modelli impiegati sono stati calibrati in situazioni diverse da quelle qui trattate (e soprattutto a terreni coltivati con pendenze meno elevate): i modelli servono solo per farsi un'idea abbastanza accurata, basata su un'interpretazione fisica del fenomeno, dell'entità dei processi erosivi e del beneficio marginale o dell'efficacia legati a ciascun tipo di intervento.
L'implementazione degli algoritmi in un ambiente di calcolo semplice e flessibile come un foglio elettronico incoraggia l'impiego di questo tipo di strumenti nella pratica ordinaria della progettazione. Si prevede comunque di rendere più affidabile, anche in senso quantitativo, la previsione fornita dai modelli con una campagna di misure di deflusso e trasporto solido in diversi contesti di interesse applicativo.
In particolare, mentre gli interventi di tipo idraulico (canalette e viminate) sono già descritti in modo soddisfacente nel modello proposto, la copertura vegetale, la protezione con *mulch* o con geostuoie, geosintetici ed altri materiali omologhi influenzano lo stato della superficie (coefficiente n di Manning e rugosità superficiale R), la coesione superficiale J, il tenore di sostanza organica e di radici nel suolo, questi ultimi concorrendo ad influenzare i parametri di distaccabilità delle particelle sotto l'azione del flusso idrico, ma poco è reperibile in letteratura riguardo ai termini quantitativi di tali effetti.
In ultima analisi, si può supporre che attraverso un esame di alcuni siti di riferimento con applicazione di diverse tipologie di protezione antierosiva, si possano ricavare i parametri rugosità

superficiale, K_t, K_i e K_r per il modello WEPP, n e J per il modello EuroSEM, che siano rappresentativi delle diverse tecniche di difesa.
Le linee guida sui parametri modellistici che ne deriverebbero potrebbero così portare ad una più affidabile ottimizzazione delle opere di difesa dall'erosione.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato sviluppato in occasione del progetto di recupero ambientale delle pertinenze della discarica della Busca a Cesena, promosso da AMGA - Azienda Multiservizi Gestioni d'Area s.p.a. e curato dall'arch.Enrica Dall'Ara. Si ringraziano gli ingg. Silvia Bondanini e Franco Gabellini di AMGA per aver supportato lo sviluppo di questa ricerca.

Bibliografia

1. Alberts, E.E., M.A. Nearing, M.A. Weltz, L.M. Risse, F.B. Pierson, X.C. Zhang, J.M. Laften, J.R. Simanton, (1998) chapter 7 of WEEP- User guide; http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/main.html
2. Beasley D.B., L.F. Huggins & E.J. Monke (1980) ANSWERS- A model for watershed planning. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers 23: 938-44.
3. Benini, G. (1990) Sistemazioni idraulico forestali; UTET.
4. Chisci, G. (1986) Influence of ch'ange in land use and management on the acceleration of land degradation phenomena in Apennines hilly areas. In G.Chisci, R.P.C. Morgan (eds), Soil erosion in the european community: impact of changing agriculture, Rotterdam, Balkema: 3-18
5. Corradini, C., F. Melone, R.E: Smith (1994) Modelling infiltration during complex rainfall sequences; Water Resources Research, Vol.30 2777-2784
6. Da Deppo, L., Datei, C., Salandin, P., Sistemazione dei corsi d'acqua, Cortina, Padova, 1997
7. Desmet, P.J.J., Govers, G.(1996) Comment on 'Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS'; Int.J. Geografical Information Systems, vol. 11 n°6,603-610.
8. ERSO (1990) I suoli della collina cesenate, Regione Emilia Romagna, Archivio Cartografico
9. Gilley , J.E. , M.A Weltz (1998) chapter 10 of WEEP- User guide; http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/main.html
10. Maione, U.(1995) Le piene fluviali;La Goliardica Pavese.
11. Mannaerts, C., Water Erosion Prediction and control, lecture notes- Water Resources Survey Postgraduate Courses, ITC – Enschede, Nl, 2000
12. Marchi, E., Rubatta, A. (1981) Meccanica dei fluidi, UTET .
13. Mitasova, H. , L.Mitas, W.M.Brown, D.Jhonston (1997) GIS tools for erosion / deposition modelling and multidimensional visualisation; http://www.2.gis.uiuc.edu:2280/modviz/reports/cerl97/rep97.html
14. Mitasova, H., J.Hofierka, M. Zlocha, L.R. Iverson (1996) Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS; Int.J. Geografical Information Systems, vol. 10 n°5,629-641.
15. Morgan R.P.C (1995) Soil Erosion & Conservation second edition, Longman Scientific & Technical.
16. Morgan R.P.C, D.D.V. Morgan, H.J. Finney (1982) Stability of agricultural ecosystems: documentation of a simple model for soil erosion assessment; *International Institute for Applied Systems Analysis* Collaborative Paper CP-82-50.
17. Morgan, R.P.C., Quinton, J.N. Smith, R.E., Govers,G., Poesen, J.W., Auerswald, K.,Chischi,G., Torri, D., Styczen, M.E.,A.J.V. (1998) EuroSEM- Documentation and user guide; http://www.cranfield.ac.uk/safe/eurosem/euro3.htm
18. Pistocchi, A. (2001a) Il ruolo della modellistica delle georisorse nei processi di pianificazione territoriale, Tesi di dottorato di ricerca, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna

19. Pistocchi, A. (2001b) Modellazione GIS-*based* dello spandimento di reflui zootecnici e dell'incidenza dell'inquinamento conseguente, inviato per la pubblicazione su Acqua & Aria
20. Regione Emilia Romagna e Regione Veneto (1993) Manuale tecnico di ingegneria naturalistica.
21. Renard K.G, G.R. Foster, G.A. Weesies. D.K. McCool, D.C. Yoder, (1997) Predicting Soil erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE); U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook n°703,404pp.
22. Renschler, C.S.¸C. Mannaerts,B. Diekkruger(1999) Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk-rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain; Catena 34 209-225
23. S.M. de Jong, M.L.Paracchini, F.Bertolo, S. Solving, J. Megier, A.P.J. de Roo (1999) Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data; Catena 37 291-308
24. Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., Unkrich, C.L. (1995) KINEROS- A kinematic runoff and erosion model, in Singh, V.P., Computer models in watershed hydrology, Wat. Res. Publications, Highlands Ranch, Colo.
25. Wishmeier W.H., D.D. Smith (1978) Predicting rainfall erosion losses; USDA Agricultural Research Service Handbook 537.