

Modellazione previsionale GIS-based dell'inquinamento di origine diffusa da fonti agricole. Un caso di studio.

di Alberto Pistocchi(*), Silvia Bettini(**), Raffaele Miserocchi(**)

(*) Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle tecnologie Ambientali (DICMA)-

Università di Bologna: viale Risorgimento, 2 –40100 Bologna

Tel.051-6443380; e-mail pistocchi@dicm0.ing.unibo.it

(**) Geoprogetti Ambiente e Territorio-

p.zza Farini, 4 –48100 Ravenna

Tel.0544-219347; e-mail geaamb@tin.it

Sommario

Viene presentato un approccio alla modellazione matematica dell'inquinamento di origine diffusa da fonti agricole, che si basa sul paradigma dei sistemi informativi geografici e sulla possibilità di descrivere i fenomeni idrologici mediante relazioni matematiche semplici e una quantità di dati capillarmente distribuiti. Vengono messe in evidenza le caratteristiche che rendono questo tipo di approccio preferibile rispetto alla modellistica classica per quanto riguarda gli scopi della pianificazione territoriale. Si illustra l'applicazione al caso di studio del bacino del fiume Savio in Emilia Romagna, mostrando l'applicabilità del metodo a partire dalle conoscenze rappresentate nella cartografia corrente.

Abstract

A mathematical modelling approach is presented for agricultural non point source pollution, based on a GIS paradigm. The capability of GIS technology is exploited so to achieve a detailed description of the study area via simple mathematical relations. The features that make the approach preferable for land use management and planning are highlighted. An application to a case study (the river Savio catchment in Emilia Romagna, Italy) is also given, that shows how the model can be set up using currently available cartography.

Introduzione

Con lo sviluppo del calcolo automatico, la modellistica matematica si è orientata alla produzione di strumenti per la simulazione dei fenomeni ambientali che sono ora caratterizzati da una notevole complessità e da un elevato grado di concettualizzazione. Questi strumenti ricorrono spesso a parametri di difficile stima e richiedono una quantità di dati che spesso sono di costosa acquisizione. Al contempo, la richiesta di informazioni da parte della pianificazione territoriale è limitata a indicazioni molto aggregate nel tempo e caratterizzate da una spazialità definita dall'area di interesse del piano. Per questo, appare estremamente utile la modellazione dei fenomeni quale può essere effettuata in un GIS di tipo raster, in particolare sfruttando la capacità di descrivere fenomeni fortemente distribuiti nello spazio mediante relazioni matematiche semplici. Un vantaggio di questo approccio è la limitata richiesta di dati –rispetto ai modelli tradizionali- per il fatto che molti dei parametri utilizzati si riferiscono a grandezze fisiche ricavabili direttamente, e non devono essere quindi tarati. Per quanto riguarda i parametri da tarare, invece, occorre prevedere una procedura di calibrazione, ma la modellazione mira a ridurre al minimo il loro impiego e la sensibilità del modello rispetto ad essi. Nel seguito si descriverà l'applicazione di una modellazione GIS-based al problema dell'inquinamento di origine diffusa.

Localizzazione e inquadramento dell'area

L'area oggetto di studio interessa il bacino del fiume Savio, dall'alto Appennino cesenate sino a una sezione di chiusura situata presso Ca' Bianchi (Molino Cento di Cesena). La superficie occupa un'area di circa 480 km² e si estende da aree di montagna (al confine con la regione Toscana) sino alla pianura, attraverso la fascia collinare. Il fiume Savio è a regime torrentizio: la portata risente notevolmente delle variazioni stagionali di pioggia; pertanto si riscontrano periodi di piena primaverili e autunnali intervallati da periodi siccitosi in estate e inverno. Da un punto di vista geologico, possiamo individuare le seguenti formazioni principali: (1) Formazione marnoso-arenacea romagnola (*Serravalliano-Tortoniano*), costituita da sequenze torbiditiche di arenarie e peliti grigie. Questa formazione occupa una porzione rilevante del territorio esaminato e si estende in entrambi i lati del fiume Savio. (2) Formazione gessoso-solfifera (*Messiniano medio*), costituita da gesso microcristallino intercalato a strati marnoso-argillosi o sabbiosi e da calcare solfifero basale. (3) Formazione a colombacci (*Messiniano medio-sup.*), costituita essenzialmente da tre facies, pelitica, arenacea e conglomeratica, contenenti degli orizzonti calcarei che danno il nome alla formazione. Sono inoltre presenti le Marne di Verghereto, costituite da marne grigie siltose in alcuni casi ricche di sabbia e con sottili intercalazioni arenacee; le arenarie del M. Comero (*Eocene sup.*), con interstrati pelitici e brecciole calcarenitiche; le arenarie e le argille plioceniche (argille grigio-azzurre e alcuni lembi di argilliti varicolorate caotiche). Le formazioni geologiche influenzano direttamente anche la morfologia del rilievo, che si presenta dolcemente ondulato su litologia

prevalentemente argillosa e più aspro nelle aree interessate dalla Formazione marnoso-arenacea. Si osserva inoltre un'ampia diffusione di fenomeni calanchivi, che insistono su zone acclivi litologicamente predisposte a una forte erosione superficiale. Per quanto riguarda l'uso del suolo, il territorio di pianura e di prima collina è adibito prevalentemente a uso agricolo, con frutteti e vigneti come colture legnose agrarie più rappresentative. Le colture erbacee sono più diffuse nella fascia di media ed alta collina e sono costituite soprattutto dal frumento e dal sorgo, che vengono coltivati in rotazione con l'erba medica (per la quale spesso si sceglie un ciclo triennale). Alle quote più elevate divengono significative le colture boschive (circa il 30% sull'intera superficie del bacino), alle quali si alternano i prati-pascolo e, in misura minore, i seminativi e i terreni incolti. In particolare, al di sopra degli 800 m si ha da un lato la predominanza delle colture boschive, dall'altro l'incremento dei prati-pascolo (60-80% della superficie non boscata) a scapito dei seminativi.

Finalità e metodologie

Scopo dello studio è di analizzare l'applicabilità di un modello semplice e *data driven* per la previsione dell'inquinamento di origine diffusa da fonti agricole alla scala del bacino. Il fenomeno è ben noto, e si può schematizzare come segue:

- composti nutrienti (di azoto e fosforo in particolare) vengono somministrati alle colture sotto varie forme, e in dosi eccedenti rispetto a quanto effettivamente assorbito dalle piante
- il ruscellamento delle acque ne porta una certa percentuale in soluzione
- una parte dei nutrienti viene invece assorbita dal suolo
- il suolo è soggetto ad erosione superficiale
- ai recettori possono giungere nutrienti sotto forma di sedimenti arricchiti in azoto e fosforo, oppure sotto forma di sostanze in soluzione nelle acque

Esistono diversi modelli di tipo distribuito che simulano il comportamento dei nutrienti e di altre sostanze alla scala di bacino (e.g. CREAMS/GLEAMS, AGNPS, SWAT...). Tutti questi modelli presentano generalmente un'attitudine a simulare i singoli eventi piovosi e i loro effetti. Solo di recente è stata sviluppata, ed è ancora in fase di beta-testing, una versione di AGNPS che consente di effettuare una simulazione in continuo (AnnAGNPS, 1998). La descrizione dei fenomeni è estremamente dettagliata e rende generalmente molto dispendioso – e a volte praticamente impossibile- utilizzare questi modelli in casi reali. I modelli suscettibili di proficuo impiego nell'ambito della pianificazione territoriale devono invece soddisfare alcuni criteri fondamentali:(1)devono essere capaci di prevedere l'evoluzione dei fenomeni di interesse, entro un certo limite di accuratezza e precisione (a seconda delle specifiche problematiche indagate); (2)devono mettere il pianificatore in grado di valutare le conseguenze delle scelte che possono essere prese sui fenomeni di interesse modellistico (in questo costituendo sistemi di supporto alle decisioni); (3)devono essere di semplice utilizzo e ragionevole possibilità di diffusione, richiedendo un numero di informazioni in ingresso commisurato alla capacità di produrle da parte dell'amministrazione pubblica e degli enti di ricerca; (4)devono produrre risultati facilmente comprensibili e divulgabili, in modo che possano venire a formare base di discussione per le decisioni di interesse collettivo; (5) devono essere accompagnati da linee guida piuttosto stringenti per la scelta dei parametri, in modo da poter essere impiegati anche al di fuori delle aree per cui sono stati calibrati senza richiedere costi di taratura eccessivi.

In questi ultimi anni si è molto diffusa, presso tutte le pubbliche amministrazioni, la tecnologia dei sistemi informativi territoriali (GIS o SIT). Si tratta di strumenti di calcolo e di gestione dei dati, di cui fino ad ora si è sfruttata la capacità di organizzare l'informazione sull'ambiente e il territorio. Nel presente studio si illustra una metodologia che consente di sfruttare i GIS al pieno delle loro capacità, ovvero per scopi non di solo immagazzinamento, ma anche di analisi dei dati, mediante algoritmi di calcolo che derivano da concettualizzazioni modellistiche della realtà fisica. I dati necessari alla conduzione dell'analisi sono stati in parte forniti dalla Regione Emilia-Romagna (Servizio Cartografico e Geologico) e dall'ARPA-Regione Emilia Romagna (Servizio Meteorologico Regionale), mentre l'ARPA-Sezione Provinciale di Forlì-Cesena ha supportato lo studio fornendo informazioni riguardo alle specificità del territorio e indicazioni di tecnica agronomica, e rendendo possibile una prima verifica sul campo, con apposito sopralluogo, delle assunzioni teoriche fatte circa le caratteristiche di uso del suolo. La cartografia da cui sono state estratte le informazioni è costituita da: (a)pedologia (scala 1:250000); (b) copertura e uso del suolo (scala 1: 100.000); (c) altimetria (scala 1: 50.000) ; (d) idrografia e viabilità (scala 1:10.000).

Dalle scale (valori indicativi riferiti al dettaglio dell'informazione contenuta) della cartografia si può desumere l'eterogeneità dei dati disponibili, e si deve notare che il dettaglio delle previsioni modellistiche è quello della scala più piccola, ovvero 1: 250.000 (si noti, fra l'altro, che il modello è estremamente sensibile ai parametri pedologici, per cui a maggior ragione la scala più piccola è in questo caso limitante). Questo aspetto pone una prima, forte limitazione alla validità dei risultati ottenuti. L'elaborazione dei dati è stata effettuata con il software GIS ILWIS 2.2. Come imposto dal tipo di dati in ingresso, la simulazione effettuata ha avuto solo lo scopo di chiarire l'applicabilità del metodo proposto. Per ottenere risultati affidabili occorre essere in possesso di dati più dettagliati, ed effettuare una descrizione di maggiore dettaglio dei processi idrologici. Indicazioni sulle linee di approfondimento da perseguire verranno fornite nelle Conclusioni.

Descrizione del modello di erosione

Il modello adottato per prevedere le perdite annuali di suolo dai versanti è quello, già da tempo noto nella letteratura del settore, di Morgan, Morgan & Finney. Si è preferito questo modello ad altri, come quello più diffuso e noto come USLE (Universal Soil Loss Equation), per la maggiore base fisica in esso inglobata. In questo modello il processo erosivo è suddiviso in una fase di distaccamento dovuta all'impatto della pioggia sul suolo e in una fase di trasporto delle particelle asportate. Si distinguono allo scopo due gruppi di variabili: quelle legate alla precipitazione e alla formazione del deflusso superficiale (*water phase*) e quelle legate alla dinamica di distacco, trasporto e rideposizione dei sedimenti (*sediment phase*); la considerazione delle due fasi del processo erosivo consente una rappresentazione di fenomeni che risultano estremamente significativi nel passaggio alla scala di bacino. Il modello ignora invece i processi di trasporto dovuti all'impatto dell'acqua sul suolo e di distaccamento per deflusso superficiale, ritenendoli trascurabili rispetto agli altri aspetti del fenomeno. Si mettono a confronto la quantità di sedimento potenzialmente distaccata dalla pioggia e la capacità di trasporto del deflusso, e si assume il valore più basso fra i due come stima delle perdite annuali di suolo. Attraverso le equazioni della *water phase* si ricavano l'aggressività della pioggia, misurata tramite la sua energia cinetica, e il volume del deflusso superficiale. Questi valori sono poi utilizzati come parametri di ingresso per la *sediment phase*, le cui equazioni consentono di ricavare sia il tasso di distaccamento che la capacità di trasporto.

Water phase (v.fig.1)

Si devono assegnare come input:

R: piovosità annua (mm).

R_n: numero di giorni piovosi in un anno.

I: intensità della pioggia (mm h⁻¹).

Il valore di questo parametro varia a seconda del clima. Per climi con una spiccata stagionalità, come quello mediterraneo, si assume un valore pari a 30.

E: energia cinetica delle precipitazioni (J m⁻³).

Q: volume di deflusso superficiale (mm).

E_t/E₀: rapporto fra evapotraspirazione reale ed evapotraspirazione potenziale.

MS: contenuto di umidità del suolo alla capacità di campo (% w/w).

BD: densità dello strato superficiale di suolo (g cm⁻³).

RD: profondità delle radici nello strato più superficiale di suolo (m).

(Questo parametro è definito come la profondità del suolo dalla superficie fino a un orizzonte impermeabile o pietroso; alla base dell'orizzonte A; sino a 1 m, qualunque sia il meno profondo).

Si possono così calcolare:

- l'erosività della pioggia $E = R (11.9 + 8.7 \log_{10} I)$

- il volume di deflusso superficiale $Q = R e^{-R_e/R_0}$

essendo :

$$R_e = 1000 MS \cdot BD \cdot RD \cdot (E_t/E_0)^{0.5}$$

$$R_0 = R/R_n$$

Sediment phase (v.fig.2, fig.3)

Si deve conoscere:

K: indice di distaccabilità del suolo (g J⁻¹).

È definito come il rapporto fra il peso del suolo distaccato e l'energia delle precipitazioni.

A: percentuale delle precipitazioni intercettate.

C: fattore di copertura vegetale (considera anche le tecniche colturali adottate e le eventuali opere di conservazione del suolo).

S: angolo di inclinazione del versante (radianti).

F: tasso di distaccamento del suolo dovuto all'impatto delle precipitazioni (kg m⁻²).

G: capacità di trasporto del deflusso superficiale (kg m⁻²).

Si ottengono così:

- la capacità di distacco dei sedimenti da parte della pioggia $F = K (E e^{-aA})^b \cdot 10^{-3}$

- la capacità di trasporto da parte del deflusso superficiale $G = C Q^d \sin S \cdot 10^{-3}$

Il valore degli esponenti e e d da assumere come segue :

$$a = 0.05;$$

$$b = 1.0;$$

$$d = 2.0.$$

Si noti che il modello, come qui presentato, vale per la scala del singolo campo, e calcola l'erosione da ogni pixel come se esso fosse isolato. Il deflusso Q e l'eccesso di pioggia rispetto alle 'perdite idrologiche' (infiltrazione, evapotraspirazione...) e viene stimato con la relazione sopra riportata che non tiene conto del fatto che ogni pixel riceve anche le acque dell'area da esso drenata. Alcuni esempi di calcolo di Q in modo da tenere conto della dinamica del bacino sono stati compiuti (e.g. deJong, 1997).

Seppure in questo caso, per mancanza di un modello digitale del terreno sufficientemente accurato, il modello è stato applicato come se tutti i pixels fossero dei campi isolati, senza effettuare alcuna forma di *routing* dei sedimenti, in un successivo approfondimento si potrà raffinare il calcolo introducendo la descrizione degli aspetti legati alla cinematica del bacino (come descritto in Pistocchi, 1998). In tal modo, potrà essere calcolata la capacità di trasporto di ogni pixel sulla base del deflusso totale. Inoltre, potrà essere effettuato un confronto fra la capacità di trasporto e tutti i sedimenti provenienti dall'area a monte di ogni pixel, e non solo quelli prodotti per distacco nel pixel. Allo scopo, esistono procedure di analisi cinematica del bacino che possono essere implementate in ogni GIS di tipo raster dotato di un operatore di *neighbourhood*. Si rinvia alla letteratura esistente per ulteriori dettagli (Pistocchi, cit.). L'analisi sull'intero bacino è stata condotta suddividendo il territorio in celle (pixel) di 50 x 50 m. Tutti i dati pervenuti sono stati uniformati a un unico sistema di coordinate (UTM), in modo da poter effettuare anche sovrapposizioni di mappe. Per quanto concerne i dati relativi alla pioggia, si sono utilizzate le stazioni riportate in tabella 1.

Tabella 1. Stazioni pluviometriche e dati di piovosità annua.

Stazione	Quota (m s.l.m.)	Piovosità annua (mm)	Num. Giorni piovosi in un anno
Verghereto	812	1304.2	111.0
Bagno di Romagna	495	1283.9	109.1
Terzo di Carnaio	704	1197.1	101.5
Diga di Quarto	325	860.6	94.9
Monte Jottone	442	848.6	84.7
Luzzena	312	854.2	77.0
Cesena	44	829.4	84.7

Mettendo in relazione le quote altimetriche con le piovosità annue, emerge una dipendenza diretta (indice della regressione lineare: $R^2=0.66$) tra questi due parametri. L'equazione ottenuta per interpolazione è la seguente: $y = 0,7086x + 708,19$ dove y rappresenta la piovosità media annua e x la quota s.l.m. Da questa equazione si può ricavare la distribuzione delle piogge sull'intero bacino. Analogamente è stata ottenuta una mappa dei giorni piovosi annui: in questo caso y rappresenta il numero di giorni piovosi in un anno (media sul lungo periodo) e il coefficiente di regressione lineare risulta pari a 0.53. L'equazione della retta è: $y = 0,0374x + 77,977$. Per i parametri MS, BD, K si sono assegnati i valori a seconda della tessitura, sulla base di tabelle specifiche (tab.2) disponibili in letteratura. Per quanto riguarda il parametro RD, la profondità dello strato superficiale è stata ricavata utilizzando le note illustrative della Carta dei suoli 1:250000 edita dalla Regione Emilia-Romagna. Chiaramente, la scala di conoscenza della pedologia (1:250.000) ha consentito, come detto, solo valutazioni di prima approssimazione.

Tabella 2. Parametri pedologici utilizzati per il modello di Morgan & Finney (da Morgan, 1995).

Tipo di suolo	MS	BD	K
Argilloso	0.45	1.1	0.02
Franco argilloso	0.40	1.3	0.40
Limoso-argilloso	0.30	1.2	0.30
Franco sabbioso	0.28	1.2	0.30
Franco limoso	0.25	1.3	0.30
Franco	0.20	1.3	0.35
Sabbie franche	0.15	1.4	0.20
Sabbioso	0.08	1.5	0.70

I parametri di uso del suolo sono stati assegnati sulla base di indicazioni di letteratura (tab.3).

Tabella 3. Parametri relativi all'uso del suolo per il modello di Morgan & Finney (da Morgan, 1995).

Uso del suolo	A	E_t/E_0	C
Seminativi	30	0.65	0.3
Frutteti	17	0.60	0.35
Boschi	30	0.95	0.002-0.004
Pascolo	20	0.75	0.15
Incolto	25	0.65	0.2
Rocce nude	0	0.05	1

La mappa di partenza per il calcolo delle pendenze è un DTM (Digital Terrain Model) ottenuto tramite interpolazione di punti disposti secondo una maglia di 250 m circa, fornito dal Servizio Meteorologico Regionale dell'ARPA Emilia Romagna. Attraverso un calcolo delle derivate direzionali nord/sud ed est/ovest, effettuato con un operatore di filtro sulla mappa raster del DTM, si ottengono le pendenze dei versanti.

Risultati della stima del sedimento eroso

Dalle due mappe esprimenti la capacità di trasporto e quella di distacco, applicando la funzione di minimo, si è ottenuta la mappa dell'erosione, che rappresenta la perdita annuale di suolo. La tabella 4 riassume i risultati ottenuti per vari tipi di uso del suolo.

Tabella 4. Perdita di suolo annuale stimata con il modello di Morgan & Finney.

Uso del suolo	Perdita di suolo (t/ha/anno)
Seminativi	4-22
Frutteti e vigneti	2-35
Prato-pascolo	<1-25
Boschi	2-5
Incolto	25-35
Rocce nude	118-134

Descrizione del modello di loading dei nutrienti

Lo studio dei nutrienti è stato effettuato seguendo gli algoritmi del modello CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems, USDA, 1980). Il modello originale è composto da tre parti (idrologia, erosione e dinamica dell'inquinamento) delle quali si è utilizzata essenzialmente quella relativa alla chimica dei nutrienti.

La dinamica degli elementi nutritivi nel suolo è influenzata da diversi fattori, come:

- caratteristiche chimico-fisiche del suolo
- concimazioni (minerali e organiche)
- asportazioni da parte delle colture
- lisciviazione ed erosione da ruscellamento

In particolare il fosforo, essendo caratterizzato da bassa mobilità, è trasportato essenzialmente per erosione dei sedimenti, mentre l'azoto, soprattutto in forma di nitrati, è più sensibile alla lisciviazione. Il modello dei nutrienti utilizzato tiene conto di tutti questi aspetti. Il modello dei nutrienti utilizza come parametri di ingresso le stime del deflusso superficiale e dell'infiltrazione (modello idrologico), nonché le stime della perdita di suolo (modello di erosione). Mediante questi parametri è possibile valutare la concentrazione media di N e P in soluzione nell'acqua di ruscellamento per ogni evento piovoso, unitamente al contenuto di elementi nei sedimenti erosi e nell'acqua di percolazione. Nelle seguenti definizioni si adotta il simbolo (-) ogni qualvolta ci si riferisce a uno degli elementi nutritivi N o P (Es.: SED- = SEDN o SEDP).

A) Elementi trasportati con il sedimento

Essi sono stimati con le seguenti relazioni, che tengono conto dei fenomeni di arricchimento del sedimento eroso in concentrazione di nutrienti, a causa della selezione granulometrica che si verifica:

$$ER- = A- \cdot SED^{B-}$$

$$SED- = SOIL- \cdot SED \cdot ER-$$

Essendo :

ER-: rapporto di arricchimento del nutriente.

SED-: quantità di elemento trasportato dal sedimento ($kg\ ha^{-1}$).

SED: quantità di sedimento asportato prevista dal modello di erosione ($kg\ ha^{-1}$).

SOIL-: concentrazione di elemento presente nel terreno (kg/kg di suolo).

(Per l'azoto si è utilizzato un valore medio pesato di $0.002\ kg/kg$ di suolo; per il fosforo di $0.00055\ kg/kg$ di suolo).

A-;B-: parametri per l'equazione di arricchimento, per i quali sono stati assunti rispettivamente i valori 7.4 e -0.2 per entrambi i nutrienti, secondo le indicazioni del modello CREAMS.

B) Elementi trasportati per lisciviazione dovuta al runoff

L'ammontare di nutrienti presenti nelle acque di ruscellamento (espresso in $kg\ m^{-3}$), e' valutato secondo le espressioni:

$$RON = C_2 \cdot EXKN_2 \cdot Q \cdot 0.01$$

$$ROP = C \cdot EXKP_2 \cdot Q \cdot 0.01$$

essendo:

EXK-1: Coefficiente di estrazione relativo alla percolazione.

EXK-2: Coefficiente di estrazione relativo al deflusso superficiale.

F: infiltrazione totale per evento piovoso (mm).

$$EXKN_1 = d \cdot POR \cdot K_1$$

$$EXKN_2 = d \cdot POR \cdot K_2$$

$$EXKP_2 = d \cdot POR \cdot K_2$$

$$C_2 = (C_1 - C_r) / K_2 \cdot Q \cdot (1 - \exp(-K_2 \cdot Q)) + C_r$$

$$C = (C_1 - C_r) / K_2 \cdot Q \cdot (1 - \exp(-K_2 \cdot Q)) + C_r$$

$$C_1 = (C_0 - C_r) \cdot \exp(-K_1 \cdot F) + C_r$$

C_r : concentrazione di nutriente nella pioggia.

C_0 : concentrazione iniziale di nutriente nell'acqua dello strato superficiale di suolo (kg m^{-3}).

K_1 : tasso di percolazione.

K_2 : tasso di ruscellamento.

Q : deflusso superficiale complessivo per evento piovoso (mm)

POR : porosità del suolo (%), assunta pari al 40%.

d : profondità dello strato superficiale di suolo, assunta pari a 10 mm.

Le espressioni sopra riportate si deducono da un bilancio del nutriente durante il deflusso, supponendo che l'azoto possa anche essere trasportato verso la falda, e che il fosforo rimanga nel suolo entro i primi centimetri. Per poter calcolare il valore dell'infiltrazione F si è dapprima valutata l'evapotraspirazione ETR con la formula di Turc, sottraendo poi il valore ottenuto alle piogge:

$$ETR = P / \sqrt{0.9 + P^2/L^2}$$

essendo $L = 300 + 25 \cdot T + 0.05 \cdot T^3$ (mm)

P = pioggia media annua (mm)

T = temperatura media annua ($^{\circ}\text{C}$)

Successivamente si è proceduto al calcolo di un coefficiente di afflusso (c_{SCS}) con il metodo del numero di curva dell'SCS (USDA), utilizzando le informazioni relative all'uso del suolo e alla tessitura dei terreni.

Infine, si è valutato il deflusso come $Q = (P - ETR) \cdot c_{SCS}$. L'infiltrato, F , è desunto come differenza dalla:

$$F = P - ETR - Q$$

trascurando tutti gli effetti di immagazzinamento nel suolo (si veda la fig. 4).

Si noti che il deflusso Q così calcolato differisce da quello utilizzata nel modello di Morgan, Morgan e Finney per l'erosione. La discrepanza è dovuta al fatto che in questo modulo è necessario calcolare l'infiltrazione, che non può essere stimata direttamente dalla stima del deflusso superficiale di Morgan in quanto in questa sono aggregate le perdite evapotraspirative e quelle di infiltrazione. Si è ritenuto che, visto il carattere esplorativo dell'applicazione, fosse opportuno valutare l'erosione senza apportare modifiche al metodo descritto in precedenza, per cui si è dovuto fare ricorso alle integrazioni ora descritte per la rappresentazione dell'idrologia.

Le figure 5, 6 e 7 riportano lo schema logico del calcolo effettuato.

Risultati

I risultati della simulazione sono dati dalla somma dei nutrienti presenti nel deflusso e nei sedimenti erosi. La figura 8, ad esempio, riporta la mappa delle perdite totali di azoto. Da un esame dei risultati, si osserva che l'azoto asportato varia fra i 10 e i 60 kg/ha anno circa, mentre il fosforo varia fra i 2 e i 15 kg/ha circa. Questi valori possono essere in certo grado di eccesso rispetto a quelli riportati in letteratura, e la tendenziale sovrastima può essere attribuita al fatto che nel calcolo si è ritenuta attiva l'intera quantità di precipitazione annua, mentre solo una parte di essa contribuisce nei fatti alla lisciviazione. Inoltre, come nello spirito del presente studio preliminare, i parametri del modello CREAMS sono stati assegnati seguendo le indicazioni di letteratura, senza un maggiore approfondimento sulla base di dati sperimentali, introducendo ulteriori motivi di incertezza. In definitiva, le mappe ottenute sono da guardare come semplici zonizzazioni della potenziale produzione di inquinamento e di erosione. Hanno già in sé un'utilità per la pianificazione di interventi e la valutazione delle priorità, ma non sono affidabili per valutazioni quantitative. Per queste ultime sono di seguito indicati gli sviluppi richiesti.

Conclusioni e sviluppi futuri

In linea di principio è possibile modellare i fenomeni legati all'idrologia di superficie, all'erosione e all'inquinamento di origine agricola diffusa, mediante modelli di notevole semplicità all'interno di un GIS di tipo raster come quello qui utilizzato. La cosa può essere fatta sia al livello delle grandezze (medie o totali) su base annuale, sia a quello del singolo evento. L'uso di tali modelli risulta di un certo interesse allorché sia richiesta la pianificazione di sistemi territoriali complessi e la redazione, in particolare, di piani di risanamento delle acque, di piani di bacino e di piani di spandimento dei reflui o di sistemazione idraulico-agraria. I principali limiti dello studio condotto sono da ricercare in quanto segue:

- attendibilità dati disponibili
- il modello non considera (almeno direttamente) la struttura del suolo, ma solo la tessitura (a differenza, in questo, della più nota USLE)
- la conoscenza delle grandezze idrologiche è solo approssimativa, e i coefficienti delle regressioni lineari utilizzate per costruire le mappe delle precipitazioni e dei giorni piovosi totali annui sono piuttosto bassi (uno è pari a 0.66, l'altro a 0.53): occorrerebbe una maggiore definizione della distribuzione del fenomeno,

come potrebbe essere dedotto da una accurata analisi di tipo geostatistico, e da un numero comunque maggiore di informazioni di pioggia.

Si intende che il presente studio costituisca un prima verifica dell'applicazione del metodo, che dovrà essere integrato con approfondimenti in merito a:

(1) una migliore conoscenza degli eventi piovosi, del loro andamento nel tempo e dell'energia cinetica della pioggia da considerare nel modello; (2) una corretta stima del deflusso mediante un modello idrologico distribuito di trasformazione afflussi-deflussi, basato su un maggiore dettaglio di considerazione dei processi (infiltrazione ed evapotraspirazione) e sul concetto del metodo cinematico per il *routing* del deflusso: un tale modello può essere integralmente realizzato all'interno del GIS mediante procedure di delineazione delle direzioni di deflusso e calcolo distribuito dei parametri dell'infiltrazione e dell'evapotraspirazione; (3) una corretta stima del carico di sedimenti in arrivo da monte ad ogni cella e conseguentemente una più accurata stima del trasporto solido del deflusso.

Inoltre, è di grande interesse ricomprendere una stima dell'apporto di nutrienti alla falda, il che suggerisce di modellare in modo più dettagliato (p.es. con le equazioni di Horton, Philip o Green-Ampt) i fenomeni di infiltrazione. Occorre ricordare che la cornice GIS e l'approccio modellistico individuati possono essere utilizzati anche per la simulazione di singoli eventi. In particolare, se si possiede una descrizione della superficie topografica sufficientemente dettagliata, si può costruire una mappa della direzione di drenaggio (Burrough, 1998), con la quale si rappresenta la cinematica del deflusso e dei sedimenti all'interno del bacino. Più in generale, la tecnologia GIS consente di descrivere in estremo dettaglio i processi occorrenti durante l'evento piovoso; possono così essere inglobati nel modello tanti aspetti (ad esempio il *crusting* dei suoli) che difficilmente sono presenti nella modellistica corrente.

Sarà pertanto interesse di un approfondimento futuro il ricorso a una modellazione dei processi idrologici più accurata secondo quanto detto, utilizzando però le sole informazioni già esistenti o quelle facilmente ricavabili, nello spirito di una modellistica dai costi sostenibili per il supporto alle decisioni di pianificazione. Lo scopo ultimo di questo tipo di valutazioni, infatti, rimane quello di fornire indicazioni circa linee di azione concreta e direttamente spendibile, nei limiti degli strumenti di piano esistenti, per la gestione dei sistemi agricoli che attualmente rappresentano una significativa fonte di inquinamento.

Bibliografia

-ARNOLD, J.G., WILLIAMS, R., SRINIVASAN, R., KING, K.W., SWAT, The soil and water assessment tool, Manual (web pages <http://www.brc.tamus.edu.swat>)

-BASLEY, D.B., HUGGINS, L.F., MONKE, E.J., *ANSWERS, a model for watershed planning*, Transactions of ASAE, pp. 938-944, 1980

- BURROUGH, P.A., McDONNELL, R., *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, Oxford, 1998.

- CASALICCHIO G., BRACCIAFERRI, *Riferimenti per l'approntamento di piani di concimazione*, AIA (Ass. Italiana Allevatori), Roma, 1993.

- CASALICCHIO G., VIANELLO G., *Elementi di Pedologia*, CLUEB, Bologna, 1979.

- CORRADINI, C., MELONE, F., SMITH, R.E., *Modelling Infiltration during complex rainfall sequences*, Water Resources Research, 30(10): 2777-2784, 1994

- DE JONG, S., RIEZEBOS, H.Th., *SEMMED: a distributed approach to soil erosion modelling*, in *Remote Sensing '96-Spiteri* (ed.)- Balkema, Rotterdam, 1996.

- DESMET, P. J. J., AND G. GOVERS, *GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information*, Catena, 25, 389-40, 1995.

- MAIDMENT, D. R., *Environmental modeling within GIS*, in *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*- M. F. Goodchild, L. T. Steyaert, and B. O. Parks (eds.), GIS World, Inc., pp. 315-324, 1996.

MITAS, L., AND MITASOVA, H., *Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention*. Water Resources Research, 33(9):1754-1762, 1998.

- MORGAN R.P.C., MORGAN D.D.V., FINNEY, H.J., *A predictive model for the assessment of soil erosion risk*, J. Agric. Eng. Res. 30, pp. 245-253

- MORGAN R.P.C., *Soil Erosion & Conservation*, Longman Scientific & Technical, London, 1995.
- PISTOCCHI A., *Rappresentazione GIS-based dei processi idrologici*, Pubbl. Interna DICMA, Bologna, 1998.
- REG. EMILIA-ROMAGNA, Serv. Informativo e statistica, Uff. Cartografico, *I suoli della collina cesenate*, 1990.
- REGIONE EMILIA ROMAGNA, Servizio Cartografico, Ufficio Pedologico, *La carta dei suoli dell'Emilia Romagna alla scala 1:250.000*; Legenda e Note Illustrative. Bologna, 1994.
- REG. EMILIA-ROMAGNA-PROV. FORLÌ-CESENA, *Carichi teorici e reali di fosforo e azoto su tre corsi d'acqua dell'Emilia-Romagna*, Bologna, 1994.
- REG. EMILIA-ROMAGNA, Serv. Meteorologico Regionale, *I numeri del Clima (temperature, precipitazioni, vento), Tavole climatologiche dell'Emilia-Romagna (1951-1994)*, Bologna, 1995.
- REG. EMILIA-ROMAGNA, Assessorato Agricoltura, *Impatto dell'uso agricolo del suolo sul dissesto idrogeologico (area pilota collina cesenate)*, Collana Studi e Ricerche, 1995.
- SEQUI P. (a cura di), *Chimica del suolo*, Patron Ed., Bologna.
- SMITH, R.F., GOODRICH, D.C., WOOLHISER, D.A., UNKRICH, C.L., *KINEROS, a kinematic runoff and erosion model*, in *Computer models of Watershed hydrology-Singh (ed.)*, Water Resources Publications, Highland Ranchs, Colorado
- USDA, *CREAMS manual*, Conservation research report n. 26, Washington, 1980.

Lista dei simboli

- R:** piovosità annua (mm).
- R_n:** numero di giorni piovosi in un anno.
- I:** intensità della pioggia (mm h⁻¹).
- E:** energia cinetica delle precipitazioni (J m⁻²).
- Q:** volume di deflusso superficiale (mm).
- E_r/E₀:** rapporto fra evapotraspirazione reale ed evapotraspirazione potenziale.
- MS:** contenuto di umidità del suolo alla capacità di campo (-).
- BD:** densità dello strato superficiale di suolo (g cm⁻³).
- RD:** profondità delle radici nello strato più superficiale di suolo (m).
- R_c:** capacità di ritenzione del suolo (g m⁻²)
- R₀:** pioggia media giornaliera (mm)
- K:** indice di distaccabilità del suolo (g J⁻¹).
- A:** percentuale delle precipitazioni intercettate.
- C:** fattore di copertura vegetale.
- S:** inclinazione del versante (radianti).
- F:** tasso di distaccamento del suolo dovuto all'impatto delle precipitazioni (kg m⁻²).
- G:** capacità di trasporto del deflusso superficiale (kg m⁻²).
- ER-:** rapporto di arricchimento del nutriente(-).
- SED:** quantità di sedimento asportato prevista dal modello di erosione (kg ha⁻¹).
- SOIL-:** concentrazione di elemento presente nel terreno (kg/kg di suolo).
- SED-:** quantità di elemento trasportato dal sedimento (kg ha⁻¹).
- F:** infiltrazione totale per evento piovoso (mm).
- K₁:** tasso di percolazione(-).
- K₂:** tasso di ruscellamento(-).
- C_r:** concentrazione di nutriente nella pioggia(kg m⁻³).
- C₀:** concentrazione iniziale di nutriente nell'acqua dello strato superficiale di suolo (kg m⁻³).
- Q:** deflusso superficiale complessivo per evento piovoso (mm).
- POR:** porosità del suolo (%)
- d:** profondità dello strato superficiale di suolo(mm)
- ETR =** evapotraspirazione effettiva annua (mm)

PRESENTAZIONE degli AUTORI

Alberto Pistocchi- Ingegnere per l'Ambiente e il Territorio, consulente di analisi ambientali e territoriali e progettista, dottorando in Georisorse e Geotecnologie presso il Dipartimento di Ingegneria Ambientale (DICMA) dell'Università di Bologna, si interessa di modellistica ambientale e di sistemi informativi geografici.

Silvia Bettini - Si è laureata nel 1998 in Scienze Ambientali (indirizzo terrestre), presso l'Università degli Studi di Bologna, discutendo una tesi riguardante il recupero agronomico di Fertilizzanti Non di Sintesi (FNS) in Provincia di Forlì-Cesena. Attualmente si interessa di Sistemi Informativi Territoriali e collabora con ARPA per studi inerenti la qualità dei suoli e la fertilizzazione organica. Svolge attività di consulenza in campo ambientale.

Raffaele Misericocchi – Si è laureato nel 1996 in Scienze Geologiche presso l'Università degli Studi di Bologna, discutendo una tesi sulla geomorfologia dell'Appennino bolognese . Si interessa di cartografia tematica e di Sistemi Informativi Territoriali applicati a problematiche di natura ambientale. Svolge attività di consulenza in campo geoambientale.

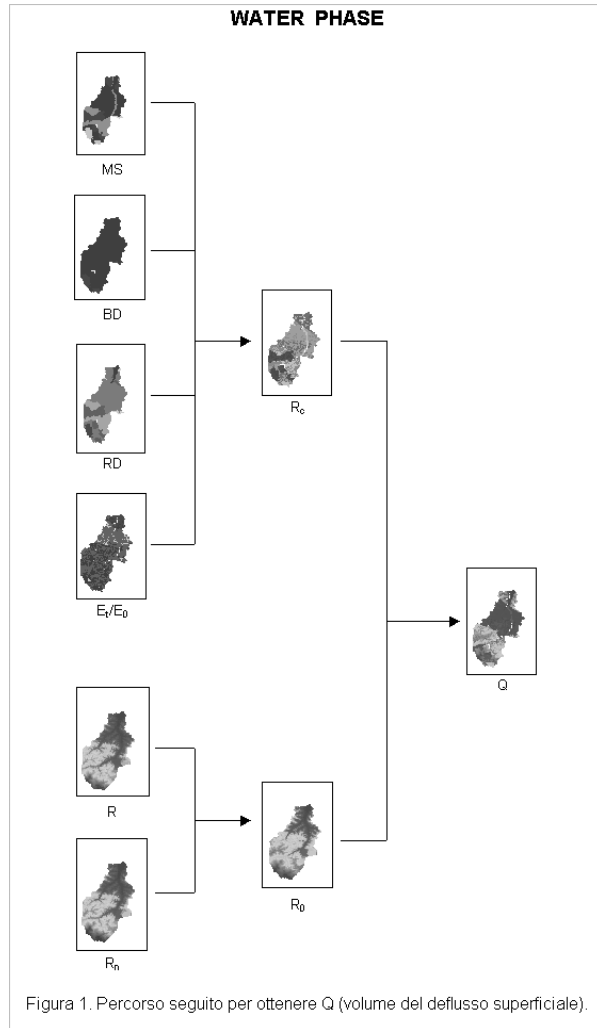


Figura 1. Percorso seguito per ottenere Q (volume del deflusso superficiale).

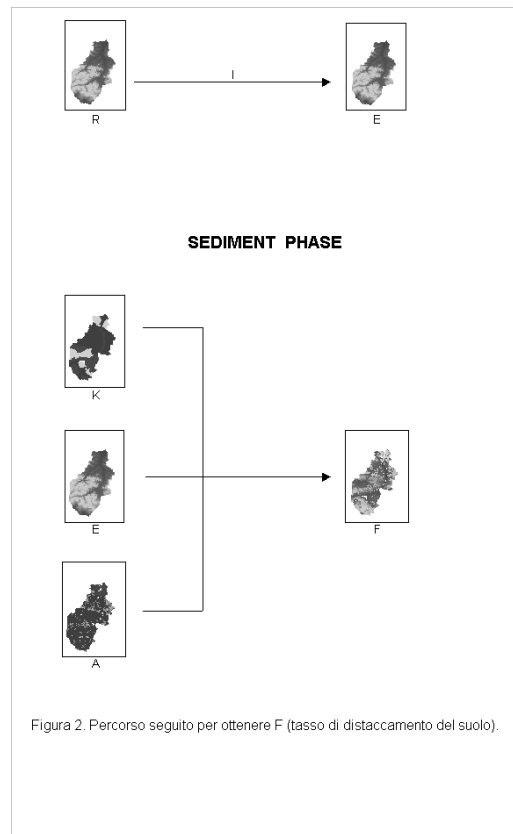


Figura 2. Percorso seguito per ottenere F (tasso di distacco del suolo).

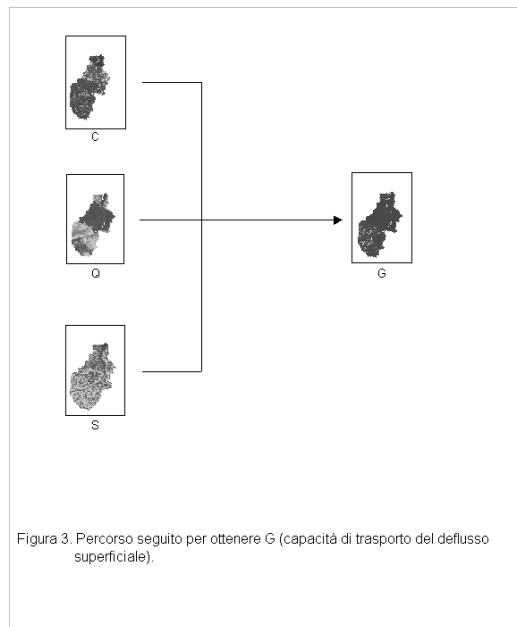


Figura 3. Percorso seguito per ottenere G (capacità di trasporto del deflusso superficiale).

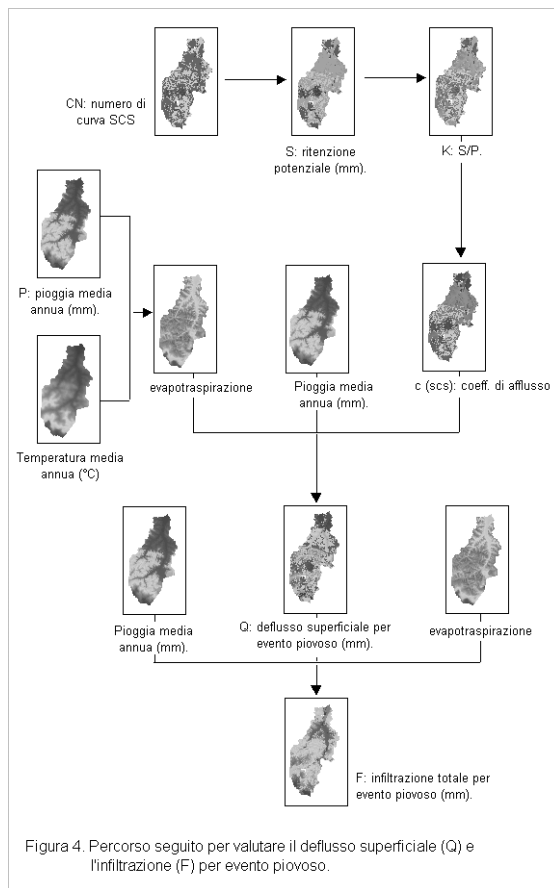


Figura 4. Percorso seguito per valutare il deflusso superficiale (Q) e l'infiltrazione (F) per evento piovoso.

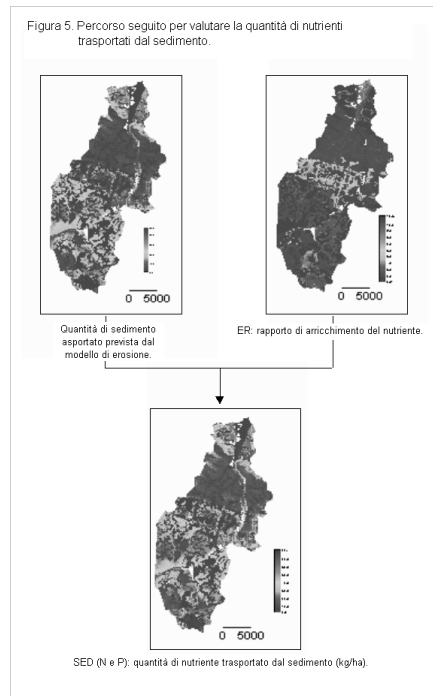


Figura 6. Percorso per valutare le quantità di N e P trasportate dal runoff.

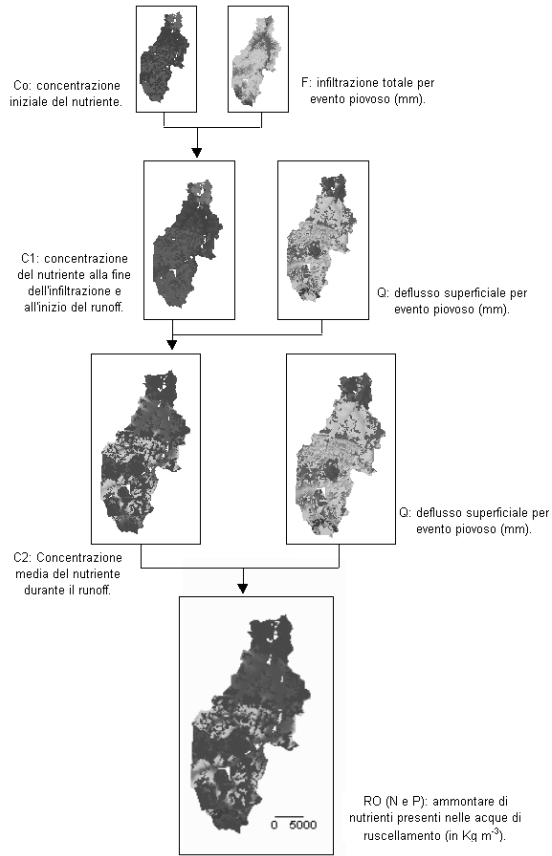


Figura 7. Ammontare totale di azoto e fosforo asportato in un anno.

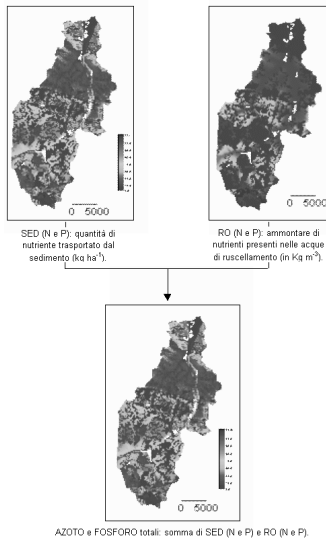


Figura 8. Mappa dell'azoto proveniente da ciascun pixel

