

Analisi GIS-based dei fenomeni idrologici per la pianificazione territoriale

di Alberto Pistocchi, Dante Neri¹

Premesse

Il bilancio idrologico serve come quadro di controllo della disponibilità di risorsa idrica e di valutazione delle forme in cui essa è presente; esso serve anche a descrivere i processi da esso controllati, e a mettere in evidenza quali sono i meccanismi di inquinamento cui la risorsa è più facilmente vulnerabile. L'evoluzione del quadro di pianificazione in Italia delinea soggetti specifici deputati al controllo del ciclo idrologico e alla gestione delle risorse idriche (rispettivamente le Autorità di Bacino, L.183/89, e le Autorità d'ambito ottimale, L. 36/94). Tuttavia, la crescente attenzione per gli aspetti di sostenibilità dello sviluppo e le residue competenze in materia di gestione delle acque che spettano agli Enti territoriali (anche a seguito del recente riordino normativo introdotto dal D.Lgs. 152/99) fanno delle risorse idriche un tema sempre più spesso presente a tutti i livelli di analisi per la pianificazione.

Nella presente memoria si descrive un'esperienza di modellazione dei processi idrologici rilevanti alla scala della pianificazione comunale, condotta in occasione delle analisi preliminari alla redazione del Piano Regolatore Generale del Comune di Sogliano al Rubicone (prov. di Forlì-Cesena). Il caso di studio si riferisce ad un'area pedemontana, prevalentemente utilizzata per attività zootecniche ed agricole, poco densamente popolata e con caratteristiche climatiche di aridità. Il substrato litologico è poco permeabile, e abbondano le aree calanchive e quelle genericamente a deflusso superficiale accelerato. Le risorse idriche del territorio sono una variabile strategica per vari motivi, fra cui sono preminenti:

- l'approvvigionamento idrico per usi produttivi;
- l'approvvigionamento idrico per uso potabile;
- il controllo della qualità dei corpi idrici superficiali (e, secondariamente, sotterranei), minacciati soprattutto dall'inquinamento di origine non puntiforme dovuto alle attività agricole e zootecniche;
- il controllo degli effetti dei dissesti idrologici, ed in particolare l'erosione dei suoli.

Il territorio di Sogliano manifesta piene di breve durata, corrispondenti alle precipitazioni intense, e quindi scarsa capacità di immagazzinare acqua da utilizzare nei periodi asciutti. I bilanci idrologici devono essere confrontati dunque con alcuni parametri di diretto interesse per la pianificazione: il fabbisogno idrico delle colture, e il fabbisogno idropotabile.

Lo studio condotto ha mirato a caratterizzare la distribuzione geografica del bilancio idrologico e dei fenomeni connessi, al fine di estrarre un supporto razionale alla pianificazione del territorio.

Procedure di calcolo per la regionalizzazione del bilancio idrologico

Il cuore dell'analisi è il bilancio idrologico, effettuato secondo il metodo di Mather e Thornthwaite (1957). I limiti di questo approccio, legati a semplificazioni dei termini del bilancio di massa e all'uso di una funzione di evapotraspirazione che dipende solo da temperatura e irradiazione solare, non sono eccessivamente rilevanti quando si desiderano indicazioni su base aggregata, come quella mensile qui utilizzata.

Si utilizza una regressione lineare multipla per la regionalizzazione dei dati di pioggia e di temperatura. Il motivo per cui si è dovuto ricorrere a questa stima è l'assenza di una buona copertura del territorio con misure meteorologiche. In queste condizioni, si è ritenuto che non si sarebbe osservato alcun sensibile miglioramento ricorrendo a tecniche di stima più sofisticate, come il krigaggio universale o il co-krigaggio.

Un'altra limitazione dello studio è da riconoscere nella scarsa qualità dei dati pedologici, che nella generalità dei casi sono insufficienti ad una corretta individuazione della granulometria dei suoli e della loro permeabilità. Lo studio del bilancio idrologico ha lo scopo di ricavare dati quantitativi sulle disponibilità idriche del bacino oggetto dello studio.

L'equazione seguente esprime il bilancio idrico su base mensile:

$$A = D + Er + Ie + \Delta S$$

dove:

A = afflussi medi annui nel bacino considerato [mm]

D = deflussi medi annui alla stazione idrometrografica che sottende il bacino considerato [mm]

Er = evapotraspirazione reale media annua [mm]

Ie = infiltrazione efficace media annua [mm]

¹ Studio di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio del dr. Ing. Alberto Pistocchi – viale Carducci, 15, Cesena. Tel. E Fax 0547-367336. E-mail alberto.pistocchi@libero.it.

Afflussi e temperature

I valori di A e T sono stati dedotti dalla pubblicazione dei dati del SIMI prodotta dalla Regione Emilia Romagna (1996), che prende in considerazione un periodo che va dal 1951 al 1994.

Dato il numero limitato delle stazioni di misure termopluviometriche, si è eseguita una regressione lineare multipla a minimi quadrati, in modo da avere una stima degli afflussi e delle temperature su tutto il territorio, dipendente solo da parametri misurabili in ogni punto.

Le equazioni di regressione sono state calcolate partendo dalla conoscenza dei dati di pioggia di 26 stazioni e dai dati di temperatura di 7 stazioni.

Come variabili indipendenti sono state scelte la distanza dalla linea di costa (D) e la quota topografica (Q) (parametri noti per ogni punto del territorio). E' disponibile un'equazione di regressione per ogni mese dell'anno, e una equazione per la media annua, sia per la pioggia (mm), sia per la temperatura (°C).

Le equazioni, la cui forma generale è del tipo $A=aD+bQ+c$, $T=a'D+b'Q+c'$ (dove a,b,c,a',b',c' sono opportuni parametri di regressione) hanno mostrato i coefficienti di regressione lineare (R^2) di Tabella 1.

Tabella 1 – coefficienti di regressione multipla

Mese di studio	Temperatura: R^2	Afflussi meteorici: R^2
Gennaio	0.65	0.75
Febbraio	0.92	0.74
Marzo	0.96	0.78
Aprile	0.97	0.87
Maggio	0.93	0.78
Giugno	0.9	0.8
Luglio	0.87	0.47
Agosto	0.9	0.46
Settembre	0.94	0.59
Ottobre	0.96	0.72
Novembre	0.93	0.76
Dicembre	0.67	0.78

Come si può notare, i coefficienti sono generalmente soddisfacenti, ad eccezione di quelli riguardanti gli afflussi meteorici dei mesi di luglio, agosto e settembre. Si è osservato comunque un netto miglioramento della stima, con questa tecnica, rispetto a quella prodotta in altre ricerche sulla base della sola quota topografica (Pistocchi *et al.*, 2000a).

Indice di aridità

Confrontando precipitazione e temperature si possono trarre utili informazioni sullo stato di umidità del terreno in rapporto alla situazione climatica ed alle esigenze della vegetazione della zona. L'indice di aridità utilizzato è quello proposto da De Martonne (ref.):

$$I_a = 12A/(T+10)$$

dove:

I_a = indice di aridità mensile

A = afflusso medio mensile

T = temperatura media mensile

Si è anche valutato l'indice di aridità medio I_{am} attraverso la relazione:

$$I_{am} = [A/(T+10)+12a/t]/2$$

dove:

A = afflusso medio annuo

T = temperatura media annua

a e t = afflusso e temperatura del mese più arido.

Evapotraspirazione

Questo parametro è stato valutato attraverso la formula di Thornthwaite, che calcola l'evapotraspirazione potenziale corretta E_{pc} (quantità d'acqua che evaporerrebbe nel caso in cui vi fosse sempre una sufficiente disponibilità idrica).

$$E_{pc} = K * 16 * (10 * T / I)^\alpha$$

$$I = \sum_{n=1}^{12} i_n$$

$$i = (T/5)^{1.514}$$

$$\alpha = 0.49239 + 1792 * 10^{-5} * I - 771 * 10^{-7} * I^2 + 675 * 10^{-9} * I^3$$

dove:

K = coefficiente (funzione della latitudine), che tiene conto delle ore di insolazione media mensile

T = temperatura media mensile

I = indice termico annuale

α = funzione cubica di I

Da questa, si ricava l'evapotraspirazione reale secondo la relazione:

$$E_r = E_{pc}, \quad \text{se } A - E_{pc} > 0$$

$$E_r = A + I \Delta R, \quad \text{se } A - E_{pc} < 0$$

dove:

E_r = evapotraspirazione reale [mm]

R = riserva idrica del suolo [mm]

ΔR = variazione della riserva idrica del suolo [mm]

Riserva idrica del suolo

Si immagina il suolo come un serbatoio che contiene acqua utilizzabile solo dalle piante.

La piovosità fornisce apporti positivi che tendono a riempire il serbatoio, mentre l'evapotraspirazione rappresenta una perdita d'acqua che porta allo svuotamento dello stesso.

Si ipotizza un valore di riserva idrica R = 200 mm. Il valore è stato scelto in linea con le ipotesi fatte in precedenti ricerche nella zona (ERSO, 1990), ma rappresenta un elemento di incertezza notevole del calcolo. In applicazioni richiedenti valutazioni precise, occorre stimare il parametro con prove *in situ*.

Il valore di R per i 12 mesi si calcola nel seguente modo:

$$R = 200 \quad \text{se } A - E_{pc} \geq 0 \text{ e } R_{\text{anno_prima}} = 200$$

$$R = R + (A - E_{pc}) \quad \text{negli altri casi}$$

Il valore di R è sempre compreso tra i valori 0 e 200 mm.

Deflusso

Per separare i deflussi superficiali si è scelto il metodo di Kennessey, per la sua applicabilità indipendentemente dalla conoscenza delle condizioni idrologiche dei suoli e della precipitazione nel singolo evento (come invece richiesto dal più noto metodo del Curve Number dell'USDA – SCS; p.es. si veda Maione, 1995). Il metodo del Curve Number è stato applicato con alcuni accorgimenti in altre ricerche (Pistocchi *et al.*, cit.), mostrando di non essere del tutto adeguato per studi di carattere pianificatorio. La scelta del metodo di Kennessey è stata sostenuta dal riscontro in letteratura di alcune verifiche sperimentali di questa tecnica nei nostri climi (Barazzuoli *et al.*, 1986).

Secondo questo metodo, il calcolo del deflusso superficiale si basa sulla stima del valore del coefficiente di deflusso Cd, calcolato come:

$$D = Cd * (A - E_r) \quad \text{se } A - E_r > 0$$

$$D = 0 \quad \text{se } A - E_r < 0$$

A = afflusso

Cd = coefficiente di deflusso

D = deflusso

Il coefficiente di deflusso dipende essenzialmente dai seguenti parametri:

- acclività della superficie topografica
- copertura vegetale
- permeabilità delle rocce affioranti
- condizioni climatiche dell'area di studio – la

Il metodo consiste nel calcolare il coefficiente di deflusso medio annuo (Cd) come semplice somma di tre componenti (Ca, Cv, Cp) dipendenti rispettivamente dall'acclività, dalla copertura vegetale e dalla permeabilità. A loro volta i tre coefficienti dipendono dall'indice di aridità mensile (Ia) calcolato secondo De Martonne.

Tabella 2 – coefficienti Ca, Cv, Cp

	Coefficienti		
	la < 25	25 > la > 40	la > 40
Acclività – Ca			
1 – maggiore del 35%	0.22	0.26	0.30
2 – tra il 10% e il 35%	0.12	0.16	0.20
3 – tra il 3.5% e il 10%	0.01	0.03	0.05
4 – minore del 3.5%	--	0.01	0.03
Copertura vegetale – Cv			
1 – roccia nuda	0.26	0.28	0.30
2 – pascoli	0.17	0.21	0.25
3 – terra coltivata, boscata	0.07	0.11	0.15
4 – bosco d'alto fusto	0.03	0.04	0.05
Permeabilità – Cp			
1 – molto scarsa	0.21	0.26	0.30
2 – mediocre	0.12	0.16	0.20
3 – buona	0.06	0.08	0.10
4 – elevata	0.03	0.04	0.05

Infiltrazione efficace

L'infiltrazione efficace si calcola nel seguente modo:

$$I_e = A - E_r - D - \Delta R, \quad \text{se } \Delta R < 0$$

$$I_e = A - E_r - D, \quad \text{se } \Delta R > 0$$

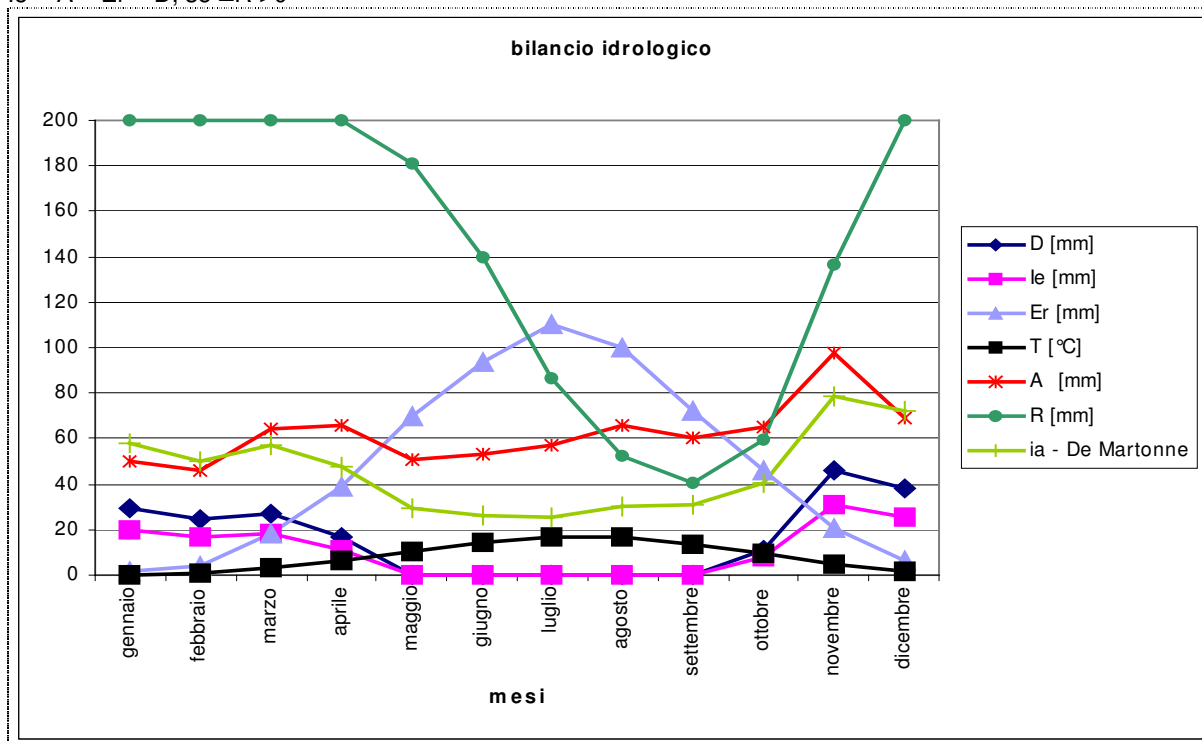


Figura 1 – grafico del bilancio idrologico per la stazione di Sogliano

In figura 1 si rappresenta il calcolo del bilancio idrologico effettuato per la località di Sogliano-Capoluogo. In maniera analoga, la valutazione può essere fatta in ogni altro punto del territorio. Se si impostano le procedure sopra descritte in termini di algebra delle mappe in un GIS (preferibilmente di tipo raster), si ottengono mappe delle varie grandezze, che possono essere utilizzate per la valutazione della distribuzione geografica di vari fenomeni. Nel caso specifico, si è utilizzato il GIS ILWIS 2.23 della PCI (1997). La figura 2 e la figura 3 illustrano lo schema di calcolo seguito per ottenere le varie mappe.

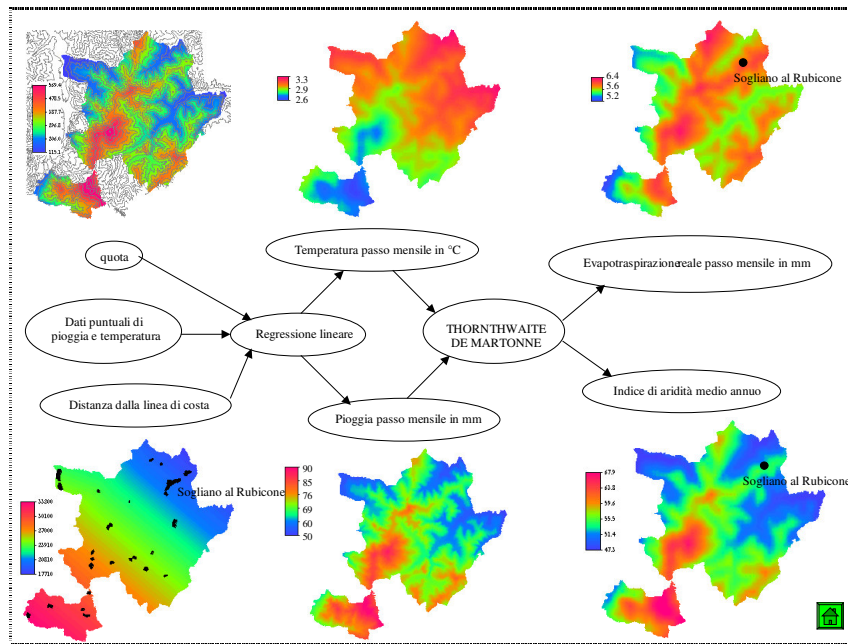


Figura 2 – bilancio idrologico: calcolo dell’evapotraspirazione e dell’indice di aridità

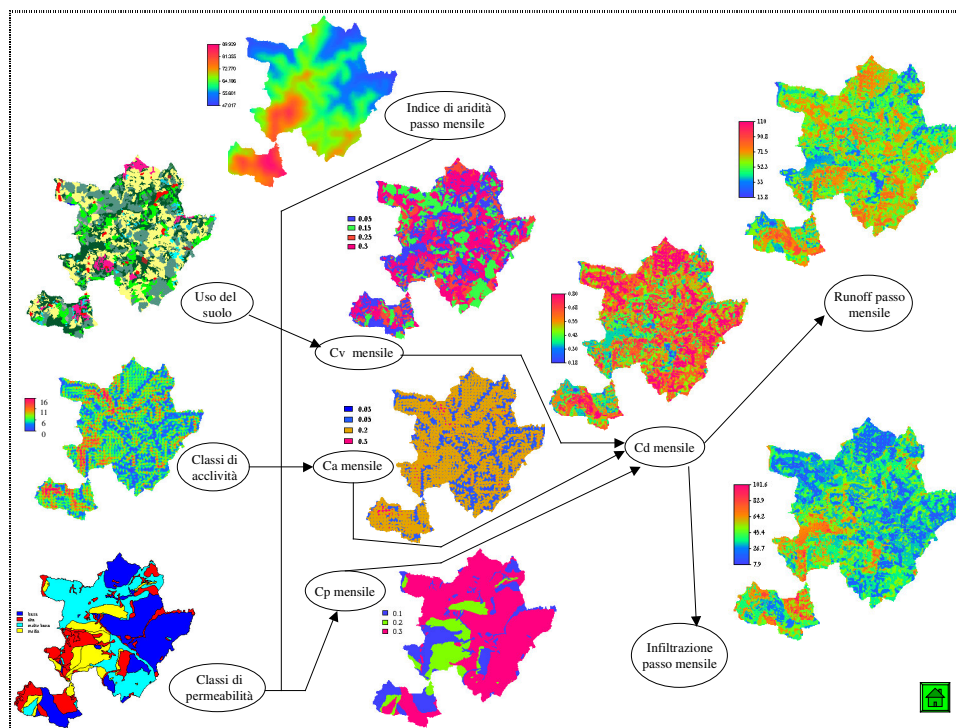


Figura 3 – bilancio idrologico: calcolo del coefficiente di deflusso, del runoff e dell’infiltrazione

L’erosione dei suoli

Il dissesto dei suoli è una causa di degrado del territorio per molti motivi (Morgan, 1995): l’apporto di sedimenti ai corpi idrici recettori è da considerare come un inquinamento in quanto viene ridotta la trasparenza e la qualità biologica delle acque; inoltre la distruzione degli strati superficiali del suolo provoca fenomeni che si amplificano e producono altri dissesti di maggiore rilievo. Infine, il suolo fortemente interessato dall’erosione subisce un drastico calo di produttività agricola. Il controllo dell’erosione rientra quindi fra gli obiettivi di ogni strumento di piano, e in particolare nella pianificazione di un comune che

considera il territorio come una risorsa ed è minacciato da situazioni di oggettiva sensibilità per i dissesti. In linea del tutto generale, si può affermare che l'erosione dei suoli dipende dai seguenti parametri:

1. pendenza topografica
2. lunghezza del pendio
3. copertura del suolo rispetto alla pioggia battente
4. intensità della pioggia, ovvero energia (cinetica) della pioggia stessa
5. erodibilità del suolo, dipendente dalla sua granulometria e dalla percentuale di sostanza organica presente
6. deflusso superficiale (quantità e velocità).

La procedura utilizzata nel presente studio è quella dell'indice USLE (Universal Soil Loss Equation, Wischmeier e Smith, 1978), che rappresenta la perdita totale di suolo su base annua (espressa in t/ha anno). Il metodo, implementato in vari codici di calcolo esistenti (es. AGNPS, refs.) sia per singolo evento, sia per stime su base aggregata, ha subito numerose modifiche in base a riscontri sperimentali. Recentemente è stata proposta una versione della procedura, definita RUSLE, che apporta alcune rilevanti modifiche circa i metodi di stima dei fattori legati all'utilizzo e alla copertura del suolo (refs.). Nel caso in esame, anche considerato che le modifiche sono state tarate su condizioni meteorologiche ed agronomiche piuttosto diverse da quelle dell'area di studio, si è preferito fare riferimento alla metodologia tradizionale.

Si deve ricordare che la valutazione non ha la precisione di una stima quantitativa puntuale: il valore di perdita di suolo annua è da assumere come un indice, che segnala situazioni di dissesto ma non predice con esattezza la quantità di suolo perduta. Ai fini delle previsioni quantitative puntuali è preferibile l'uso di modelli a più solida base fisica, come per es. il modello di Morgan *et al.* (1982), quale utilizzato p.es. da Pistocchi *et al.*, cit.

Come considerazione generale è degno di nota che, comunque, la taratura di un modello di erosione richiede un insieme di dati raramente disponibili. In particolare, è estremamente difficile disporre di misure adeguate di trasporto solido, per cui la calibrazione e validazione di modelli alla scala del bacino è del pari difficile. Le equazioni come USLE possono essere impiegate alla scala del singolo campo, mentre varie modifiche sono state proposte al modello di Morgan *et al.* per poterlo impiegare alla scala del bacino (de Jong, 1994). Sono in corso ricerche per ulteriori affinamenti del metodo, secondo le proposte di Pistocchi *et al.*, 2000. L'uso di indici rappresentativi delle pratiche di uso del suolo, della copertura vegetale e dei fattori topografici, pedologici e idrologici consente tuttavia di fornire alla pianificazione indicazioni razionali in termini comparativi, per la selezione delle aree di intervento prioritario.

L'indice USLE consente infatti di valutare gli effetti di diverse pratiche di gestione agronomica sull'erosione.

I fattori presi in considerazione per stimare la perdita di suolo, sono:

- l'aggressività della pioggia (erosività, fattore R);
- la suscettività del suolo all'erosione (erodibilità, fattore K);
- la lunghezza e la pendenza del versante (fattore topografico, LS);
- la copertura vegetale e le tecniche culturali (fattore C);
- le eventuali opere sistematorie conservative (fattore P).

Questi fattori sono moltiplicati a fornire la stima delle perdite di suolo seguente:

$$A = R * K * LS * C * P$$

dove A = perdita di suolo in t/ha anno

L'erosività R dipende dall'indice di erosione (EI), determinato dal prodotto di due caratteristiche dell'evento piovoso:

- E = energia cinetica della pioggia, responsabile del distacco delle particelle di suolo;
- I = intensità massima dell'evento, di durata pari a 30 minuti, responsabile del loro trasporto a valle attraverso la formazione del ruscellamento.

Per il calcolo di E, si divide l'evento piovoso in intervalli di uguale intensità e per ognuno di essi si calcola l'energia cinetica unitaria attraverso il seguente algoritmo:

$$e = (0.119 + 0.0873 \log i)p \quad \text{se } i < 76 \text{ mm/h}$$
$$e = 0.283 \quad \text{se } i > 76 \text{ mm/h}$$

e = energia cinetica unitaria [MJ/ha mm]

i = intensità media dell'intervallo [mm/h]

p = quantità di pioggia caduta nell'intervallo

E = Σe , dove la sommatoria è estesa a tutti i valori del periodo considerato (p.es. l'anno)

Il fattore R corrisponde alla media annuale dell'indice di erosione (EI) calcolata per un numero sufficiente di anni (10 – 15) visto che l'andamento delle precipitazioni in un dato luogo è soggetto a variazioni cicliche di tipo poliennale.

Vista la mancanza dei dati necessari per il calcolo preciso del fattore R, è stato utilizzato il valore indicato dall'ERSO: R = 1446.2 [MJ.mm/ha.h.a]

Per erodibilità del suolo si intende la perdita di suolo per erosione dovuta alle caratteristiche dello stesso, indipendentemente dagli altri fattori esterni.

Per calcolare il fattore K, sono disponibili diagrammi (es. USDA-ARS, 1997; ERSO, cit.), che richiedono la conoscenza dei valori percentuali di sabbia (0.1 – 2 mm), di limo + sabbia molto fine (%), (0.1 – 0.05 mm), di sostanza organica (%), oltre che della permeabilità e struttura pedologica del terreno.

Il fattore topografico LS prende in considerazione la pendenza e la lunghezza del pendio. La lunghezza (L) è definita come la distanza tra il punto di origine del ruscellamento e il punto in cui la pendenza diminuisce e si verifica la sedimentazione, oppure il punto in cui le acque di ruscellamento penetrano in un canale ben definito, il quale può essere sia un elemento del reticolo idrografico, sia un opera di diversione.

La pendenza (S) è quella media del versante, idrologicamente definito come sopra. L'equazione seguente fornisce il fattore LS:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m * (0.065 + 0.045 * s + 0.0065 * s^2)$$

dove:

λ = lunghezza del versante [m]

s = pendenza %

m = 0.2 per versanti con pendenza minore del 1%; 0.3 per pendenze comprese tra 1 – 3%; 0.4 per pendenze comprese tra 3 – 5%; 0.5 per pendenze superiori al 5%.

Gli effetti della copertura vegetale e delle tecniche colturali interagiscono tra di loro e quindi sono stati inglobati in un unico fattore di influenza (C).

Il valore di questo fattore può variare nel corso dell'anno perché l'effetto protettivo della copertura vegetale non dipende solo dal tipo di vegetazione e dal suo stadio di accrescimento, ma cambia in relazione alla distribuzione della erosività delle precipitazioni.

Il fattore C viene calcolato per ogni particolare coltura e per ciascuna fase del ciclo colturale, oppure in combinazione con le eventuali successioni colturali (rotazioni), tenendo conto della distribuzione dell'indice di erosione EI durante le fasi suddette.

Il fattore C medio annuo per le varie colture presenti nel territorio è stato calcolato seguendo gli schemi riportati in ERSO, cit. (Tab. 3).

Tabella 3 – fattore C

uso del suolo	Fattore C
Colture specializzate	0.259
calcolato come media dei fattori C delle colture seguenti:	
- Vigneto con due lavorazioni/anno	0.451
- Vigneto inerbito	0.163
- Frutteto con 3 lavorazioni/anno	0.296
- Frutteto inerbito	0.126
Prati stabili	0.135
Cespuglieti	0.112
Colture agrarie permanenti	0.097

Il fattore P caratterizza l'effetto antierosivo delle opere di sistemazione del suolo. Il valore di P per vari tipi di pratiche è riportato in letteratura. Nel nostro caso si può ipotizzare che non ci siano significative lavorazioni atte a ridurre le perdite di suolo, e conseguentemente si assume P = 1 per tutto il territorio comunale.

Per la stima di questo indice si è fatto riferimento a studi esistenti in un'area vicina (ERSO, cit.), dalla quale il territorio esaminato non si differenzia sostanzialmente sotto il profilo pedologico. Tutti i parametri sono stati ricalcolati, comunque, per le situazioni specifiche. Si è anche valutato diversamente, sulla base del modello digitale del terreno reso disponibile dai dati della Regione Emilia Romagna (che pure è piuttosto grossolano, rappresentando curve di livello ogni 50 m), il fattore di lunghezza e pendenza del versante. La pendenza è quella locale calcolata con uno schema a differenze finite centrali, mentre la lunghezza del pendio è stata valutata considerando la distanza dagli oggetti che interrompono il pendio stesso: elementi del reticolo idrografico, macchie di bosco e cespugli. Per quanto difficile da stimare, è evidente che può esistere una sovrastima della lunghezza del pendio dovuta alla non considerazione di altri possibili ostacoli al deflusso. Ai fini della pianificazione, e non del progetto dei singoli interventi, si può ritenere che l'approssimazione della mappa sia comunque soddisfacente.

In Figura 4 è descritto sotto forma di diagramma di flusso il procedimento di calcolo della USLE. Partendo dai dati di uso del suolo, pendenza, pioggia, pedologia e permeabilità, si ricavano i 5 fattori precedentemente descritti e si procede al calcolo della stima di perdita di suolo per il territorio di Sogliano.

L'inquinamento diffuso

L'inquinamento delle acque e dei suoli presente in territorio di Sogliano al Rubicone è prevalentemente legato alle attività agricole-zootecniche, e in particolare agli spandimenti di reflui di allevamento, mentre in forma meno pesante alla generica concimazione delle colture.

Queste fonti si riferiscono essenzialmente all'azoto e - in misura più contenuta - al fosforo.

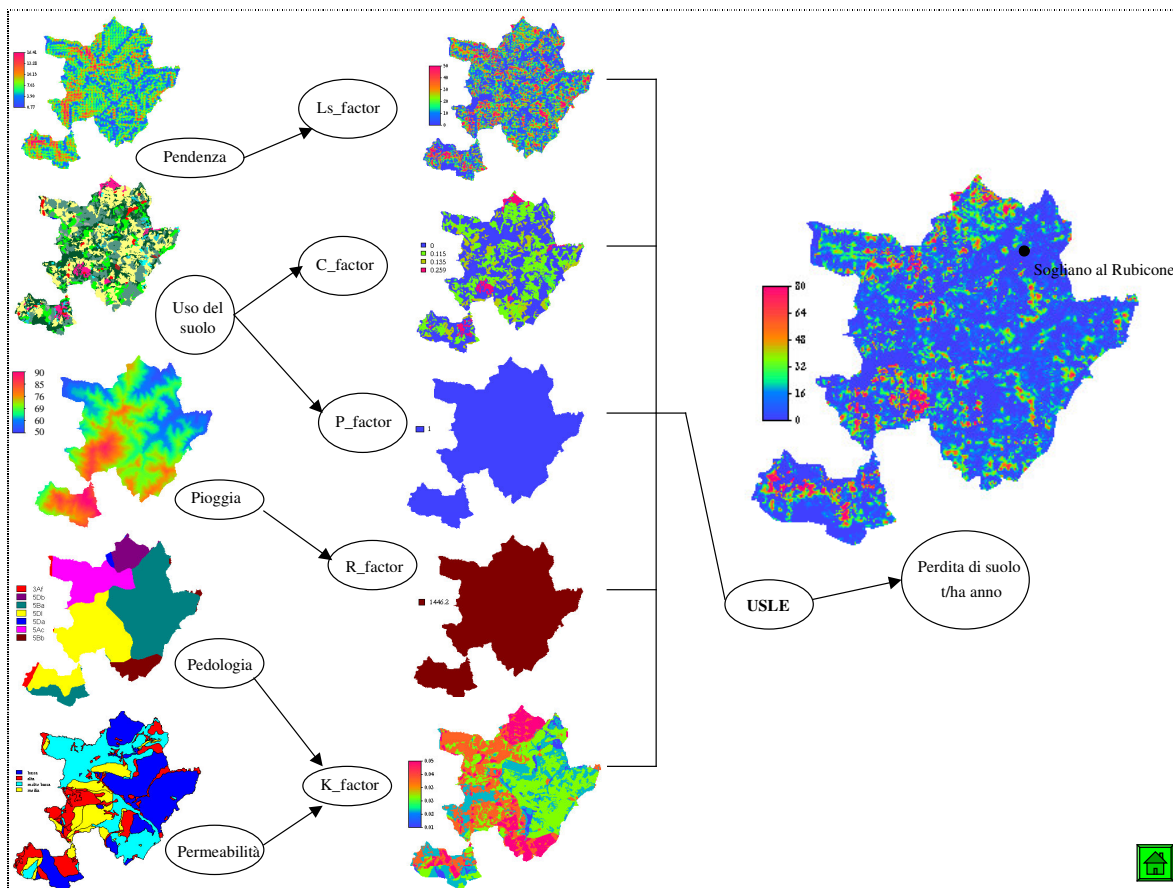


Figura 4 – calcolo della USLE

Il calcolo delle portate massiche di inquinanti in ingresso è stato condotto a partire dalla conoscenza delle dosi di spandimento dei reflui zootecnici (ipotizzate pari ai limiti di normativa, in assenza di dati più affidabili) e del numero di abitanti equivalenti corrispondenti ad ogni scarico civile o produttivo censito. Non si sono presi in considerazione sversamenti non autorizzati di liquami, che peraltro non sembrano frequenti in territorio di Sogliano. I valori della concentrazione di azoto totale negli scarichi è stata dedotta da indicazioni di letteratura, e comunque non pare necessario un dato di maggiore dettaglio.

Una volta noti gli scarichi, sia diffusi sia concentrati, si è provveduto a ripartirli fra le varie fasi del ciclo idrologico, secondo le leggi empiriche, basate su numerose osservazioni fisiche, messe a punto nel modello CREAMS (USDA, 1982) e nella sua variante, GLEAMS. Si deve notare che questo modello è fra gli approcci suggeriti dalla recente normativa (D.Lgs. 152/99) per la stima della vulnerabilità del territorio rispetto ai nitrati, e rappresenta un metodo relativamente avanzato di valutazione in contesto nazionale. Il modello calcola la concentrazione dell'azoto nel deflusso superficiale, nell'infiltrazione verso la falda, e nel sedimento eroso. Ovviamente, quindi, è stato necessario effettuare il calcolo dell'erosione e del deflusso superficiale prima di applicare il modello.

Visto anche che l'erosione e il deflusso superficiali sono stati calcolati con dati piuttosto incerti, il risultato di questa analisi è valido solo per ordini di grandezza.

Per il territorio di Sogliano si sono considerati valori delle somministrazioni di azoto desunti dalla letteratura, dalle normative e dagli archivi di Provincia di FC e ARPA di F, come riportato in tabella 4.

Tabella 4- fonti di origine diffusa : terreni di spandimento e suoli coltivati

Terreni di spandimento	Carico azoto
- zone non vulnerabili	340 kg/ha anno
- zooselezioni	Valori ad hoc a seconda della concentrazione di sodio presente nel terreno
Suoli coltivati	
- seminativi	180 kg/ha anno
- colture specializzate miste	90 kg/ha anno
- colture agrarie permanenti	90 kg/ha anno

La concentrazione iniziale di azoto presente nel suolo, assunto lo spessore del suolo in cui si considera distribuito l'azoto pari ad 1 cm, e la densità media del suolo di 1500 kg/mc (da cui risulta che il volume di suolo disponibile in 1 ha di superficie è $1 \text{ cm} * 1 \text{ ha} = 0.01 * 10000 \text{ mc} = 100 \text{ mc}$), è pari alla dose di concimazione o di spandimento divisa per 150000 kg. Ad es., per spandimenti di reflui zootecnici in zone non vulnerabili si ottiene una concentrazione iniziale di azoto per ha anno = $340/150000 = 0.002266 \text{ kg azoto/kg suolo}$.

Insieme ai carichi di origine diffusa, si sono considerate le immissioni concentrate, che nel caso specifico corrispondono ai soli scarichi di reflui civili.

In ambito urbano, il carico pro capite d'azoto di origine domestica è valutabile pari a circa di 12 g/ab/giorno (corrispondente a 4.38 kg/ab/anno), secondo le indicazioni di letteratura (p.es. Andreottola e Canziani, 1990). La tabella 5 riporta le stime per il caso di studio, basate sul criterio ora detto.

Tabella 5 - fonti localizzate: popolazione (metabolismo e detersivi liberati nell'ambiente con gli effluenti domestici)

Scarichi Civili	Abitanti Equivalenti	Carico Azoto [Kg/Anno]
- Depuratore Sogliano	1500	6570
- Scolmatore Sogliano	400	1752
- Imhoff Sogliano	45	197.1
- Imhoff Sogliano	150	657
- Imhoff Montetiffi	50	219
- Depuratore Bivio Montegelli	300	1314
- Imhoff Montegelli	130	569.4
- Imhoff Ponte Uso	130	569.4
- Scarico Diretto Villaggio Baviera	150	657
- Imhoff Montepetra	90	394.2
- Depuratore Rontagnano	130	569.4
- Imhoff Bagnolo	30	131.4
- Imhoff Rontagnano	30	131.4

Per valutare i carichi che effettivamente raggiungono il corpo idrico si devono prendere in considerazione le perdite che essi subiscono nel passaggio dalla fonte al recettore. Nel caso specifico, si è stimato che solo il 5% del carico di azoto di origine puntiforme raggiungesse il recettore (Provincia di Forlì-Cesena, 1996).

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 di colture
- lisciviazione ed erosione da ruscellamento

In particolare l'azoto, soprattutto in forma di nitrati, è piuttosto sensibile alla lisciviazione.

Il modello scelto tiene conto in qualche modo degli aspetti descritti, pur trascurando in modo drastico i fenomeni di *uptake* da parte delle piante, e utilizza come parametri d'ingresso:

- deflusso superficiale (calcolato nel bilancio idrologico)
- infiltrazione efficace (")
- perdita di suolo (stimata con la USLE)

Mediante la conoscenza di questi dati è possibile valutare

- concentrazione media dei nutrienti in soluzione nell'acqua di ruscellamento
- contenuto dei nutrienti nei sedimenti erosi
- contenuto dei nutrienti nell'acqua d'infiltrazione

a) elementi trasportati con il sedimento

questo parametro è stimato 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:

$$ERN = A * SED^B$$

$$SEDN = SOILN * SED * ERN$$

dove:

A = 2 (valori medi di letteratura)

B = -0.25 (")

ERN = rapporto di arricchimento dell'azoto

SEDN = quantità di azoto trasportato nel sedimento [kg/ha anno]

SED = quantità di sedimento asportato prevista dal modello di erosione [kg/ha anno]

SOILN = concentrazione di azoto presente nel terreno [kg/kg di suolo]

Il valore SOILN deriva dalla conoscenza dei carichi d'azoto delle diverse sorgenti produttrici: per il territorio di Sogliano si sono considerati i valori desunti dalla letteratura e dagli archivi di enti come Provincia ed ARPA.

b) elementi trasportati per lisciviazione dovuta al runoff ed elementi trasportati per infiltrazione

L'ammontare di nutrienti presenti nelle acque di ruscellamento [kg/mc] è valutato attraverso le seguenti espressioni:

$$RON = C_{2m} * EXKN_2 * Q * 0.01$$

dove:

C_{2m} = concentrazione media di azoto durante il runoff

$EXKN_2$ = coefficiente di estrazione per runoff = 0.2

Q = RO deflusso superficiale utile complessivo annuo [mm]

$$C_{2m} = ((C_1 - C_r) / (K_2 * Q)) * (1 - \exp(-K_2 * Q)) + C_r$$

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

$$C_{1m} = ((C_0 - C_r) / (K_1 * F)) * (1 - \exp(-K_1 * F)) + C_r$$

$$EXKN_1 = d * POR * K_1$$

$$EXKN_2 = d * POR * K_2$$

RO = deflusso complessivo annuo [mm]

C_r = concentrazione di nutriente nella pioggia (assunta = 0)

C_1 = concentrazione alla fine dell'infiltrazione e all'inizio del runoff

C_{1m} = c concentrazione media di azoto durante l'infiltrazione

C_0 = concentrazione iniziale di nutriente nell'acqua dello strato superficiale del suolo [kg/mc]

K_1 = tasso di percolazione

K_2 = tasso di ruscellamento

POR = porosità del suolo [%], assunta pari al 40%

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

$EXKN_1$ = coefficiente di estrazione per infiltrazione = 0.25

F = infiltrazione

L'ammontare di nutrienti presenti nelle acque di infiltrazione [kg/mc] è valutato attraverso le seguenti espressioni:

$$DWN = C_{1m} * EXKN_1 * I_e * 0.01$$

dove:

I_e = F-dpor - infiltrazione efficace [mm]

dpor = volume pori (supposto = 0)

Si ricava quindi:

RONtot = RON*Q*10000/1000 - azoto in runoff in kg/ha anno

DWNtot = DWN*Ie*10000/1000 - azoto in infiltrazione in kg/ha anno

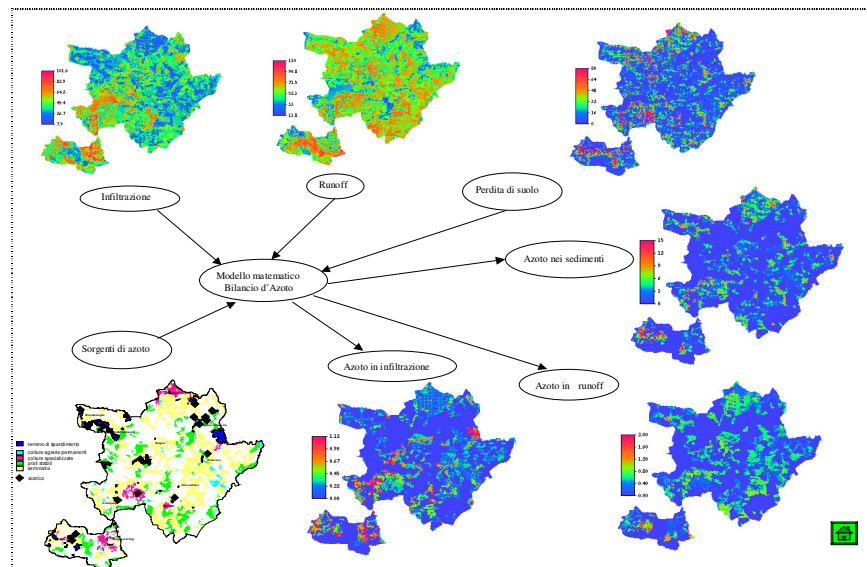


Figura 5 – calcolo dei contributi d'azoto nei sedimenti, in runoff e in infiltrazione

Ovviamente, date le semplificazioni modellistiche e l'approssimazione dei dati, le valutazioni condotte con questa tecnica devono essere interpretate sempre in senso comparativo, e consentono di evidenziare i luoghi dove è più urgente il fenomeno. Sia la consistenza quantitativa effettiva del fenomeno, sia il dimensionamento di interventi devono essere valutati con un contenuto maggiore di conoscenza, per esempio ricorrendo al modello CREAMS completo e ai suoi derivati (p.es. AGNPS, SWAT, EPIC).

L'uso delle valutazioni nella pianificazione

Le valutazioni quantitative, condotte sulla base della stima – almeno in termini comparativi- dei fenomeni, fornisce in linea di principio una base di razionalità per la discussione dei possibili scenari di piano e della scala di priorità degli interventi. E' immediato interpretare le mappe che risultano dallo studio in termini di priorità di intervento per la lotta all'inquinamento diffuso e all'erosione. Una discussione sull'uso delle valutazioni e delle analisi ambientali ai fini del supporto alle decisioni è fornita in Pistocchi *et al.*, 2000b). La messa a punto di un sistema di valutazione idrologica del territorio non esime ovviamente dal produrre informazioni più aggiornate e affidabili, che comunque possono essere inserite nella cornice qui delineata senza alterarne la struttura.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato svolto nell'ambito degli studi preliminari alla redazione del Piano Regolatore Generale di Sogliano al Rubicone, coordinati dall'arch. E.Preger di Cesena per gli aspetti generali, e dall'ing. A.Pistocchi per le analisi dell'ambiente e del territorio. I dati utilizzati provengono dall'archivio cartografico della Regione Emilia Romagna, dal SIT della Provincia di Forlì-Cesena e da ARPAER (Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente dell'Emilia Romagna, Sezione Provinciale di Forlì-Cesena).

Bibliografia

- Andreottola, G., Canziani, R., Cossu, R., Rimozione biologica dei nutrienti dalle acque di scarico, Ist. Per l'Ambiente, Milano, 1990
- Barazzuoli, P., Micheluccini, M., Salleolini, M., Salvadori, L., Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale: applicazione del metodo di Kennessy al bacino del torrente Farma e sua verifica con i calcoli di bilancio, Boll. Soc. Geol. It., n.105, 1986
- Maione, U., Le piene fluviali, La Goliardica, Pavia, 1995
- Pistocchi, A., Sistemi informativi geografici e pianificazione delle attività estrattive, Quarry & Construction, giugno 1999
- Pistocchi, A., Bettini, S., Miserocchi, R., Modellazione previsionale *GIS-based* dell'inquinamento di origine diffusa da fonti agricole. Un caso di studio. Ingegneria Ambientale, n.2 – febbraio 2000 (a)
- Pistocchi, A., Preger, E., Neri, D., Il sistema di supporto alle decisioni sull'ambiente e il territorio per il piano regolatore di Sogliano al Rubicone (FC) , acc.to per la pubblicazione in Urbanistica, 2000(b) ; in prep.

- Provincia di Forlì-Cesena, Qualità dei fiumi: 12 anni di monitoraggio, Forlì, 1999
- ERSO, Regione Emilia Romagna, I suoli della collina cesenate, Bologna, 1990
- Regione Emilia Romagna, Provincia di Forlì-Cesena, Carichi teorici e reali di azoto e fosforo su tre corsi d'acqua dell'Emilia Romagna, Forlì, 1994-1996
- Regione Emilia Romagna, Servizio Meteorologico Regionale, I numeri del clima, Bologna, 1995
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., Introduction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance, Thornthwaite Ass., Lab. Of Climatology, Elmer, N.Y., 1957
- USDA, CREAMS Manual – Conservation research report n.26, may 1982
- Vismara, R., Ecologia applicata, Hoepli, Milano, 1992
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., Prediction rainfall erosion losses: a guide to conservation planning, Washington D.C., USDA handbook 537, 1978