

Acutis, Marco; Argenti, Giovanni; Caredda, Salvatore; Cavallero, Andrea; Ducco, Giorgio; Fara, Gianfranco; Grignani, Carlo; Pardini, Andrea; Porqueddu, Claudio; Reyneri, Amedeo; Sulas, Leonardo; Talamucci, Paolo; Zanchi, Camillo (1997) *Modellizzazione della percolazione profonda dell'acqua nel terreno: calibrazione e validazione dei codici CREAMS e LEACHW in diversi suoli e colture foraggere*. Rivista di agronomia, Vol. 31 (1), p. 33-41. ISSN 0035-6034.

<http://eprints.uniss.it/4220/>

RIVISTA DI

AGRONOMIA

ANNO XXXI - N. 1 - GENNAIO-MARZO 1997



Consiglio Direttivo:

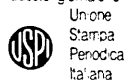
FRANCESCO BONCIARELLI - Presidente
ENRICO BONARI - Vice Presidente
ANGELO CALIANDRO - Membro
GIULIANO MOSCA - Membro
CARLO FAUSTO CERETI - Segretario tesoriere

© 1997 Edagricole S.p.A.

Direzione: Dipartimento di Agronomia e Produzione erbacee dell'Università di Firenze - Piazzale delle Cascine, 18 - 50144 Firenze - Redazione, Pubblicità, Abbonamenti, Amministrazione: Via Emilia Levante, 31 - 40139 Bologna - Tel. 051/49.22.11 (15 linee) - Telefax (051) 493660. Cas. Post. 2157-40139 Bologna - Ufficio di Milano: 20133 - Via Bronzino, 14 - Tel. 02/29.522.864 - Ufficio di Roma: 00187 - Via Boncompagni, 73 - Tel. 06/4288.10.98-4288.12.22. Internet web site: www.agriline.it/edagri

Internet e-mail: ag@edagricole.agriline.it
Direttore responsabile: Prof. Paolo Talamucci - Reg. Tribunale di Bologna n. 3236 del 12-12-1966 - Comma 26 art. 2 L. 28-12-1995 n. 549. Abbonamenti e prezzi Italia (c/c postale 366401): Abbonamento annuo L. 69.000 - Un numero L. 17.250 - Arretrati e numeri doppi L. 34.500 - Annate arretrate L. 100.000 - Estero: Abbonamento annuo L. 85.000 - Con spedizione via aerea L. 110.000 - Rinnovo abbonamenti Italia: Attendere l'avviso che l'Editore farà pervenire un mese prima della scadenza. Per Enti e Ditte che ne facciano richiesta l'avviso verrà inoltrato tramite preventivo Iva assolta alla fonte dall'Editore ai sensi dell'art. 74, 1 comma, lett. c, D.P.R. 26.10.1972 n. 633 e successive modificazioni ed integrazioni. La ricevuta di pagamento del conto corrente postale è documento idoneo e sufficiente ad ogni effetto contabile. Tutti i diritti sono riservati: nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta, memorizzata o trasmessa in nessun modo o forma, sia essa elettronica, elettrostatica, fotocopia, ciclostile, senza il permesso scritto dell'Editore.

Questo giornale è associato alla



Stampa: Stabilimento Tipografico «Pliniana»
Selci-Lama (PG)

A cura della Società Italiana di Agronomia
col Contributo finanziario del Consiglio Nazionale delle Ricerche

Comitato scientifico e direttivo:

ENRICO BONARI	ATTILIO LOVATO
ANGELO CALIANDRO	MARIO MONOTTI
ANDREA CAVALLERO	PAOLO PARRINI
GINO COVARELLI	FERDINANDO PIMPINI
MAURO DEIDDA	GIUSEPPE RESTUCCIA
LUIGI GIARDINI	RICCARDO SARNO
GIUSEPPE LA MALFA	GIOVANNI TODERI
RENZO LANDI	GIANPIETRO VENTURI
FRANCO LORENZETTI	GIUSEPPE ZERBI

Direttore responsabile: PAOLO TALAMUCCI

Segretario di redazione: ROBERTO ANDERLINI

SOMMARIO

- 1 Il controllo dei sistemi riproduttivi nel miglioramento genetico delle piante agrarie
Paolo Parrini
- 3 L'impiego di tecniche citofotometriche nello studio della ibridazione interspecifica
Andrea Cavallini
- 8 Le tecniche di bandeggio cromosomico nello studio della ibridazione interspecifica dei frumenti (*Triticum* spp.)
Rosanna Simeone e Antonio Blanco
- 14 L'osservazione citologica ed istologica come mezzo d'indagine nello studio dei sistemi riproduttivi
Stefano Tavoletti, Gianni Barcaccia e Fabio Veronesi
- 18 Marcatori cellulari, morfologici e molecolari per lo studio dei sistemi riproduttivi in *Poa pratensis* L. e *Medicago* spp.
Gianni Barcaccia, Stefano Tavoletti, Daniele Rosellini e Mario Falcinelli
- 27 Applicazione dell'ibridazione «in situ» allo studio dei sistemi riproduttivi
Serena Varotto, Francesco Salamini e Richard Thompson
- 33 Modellizzazione della percolazione profonda dell'acqua nel terreno: calibrazione e validazione dei codici CREAMS e LEACHW in diversi suoli e colture foraggere
Marco Acutis, Giovanni Argenti, Salvatore Caredda, Andrea Cavallero, Giorgio Ducco, Gianfranco Fara, Carlo Grignani, Andrea Pardini, Claudio Porqueddu, Amedeo Reyneri, Leonardo Sulas, Paolo Talamucci e Camillo Zanchi
- 42 Modellizzazione della lisciviazione dei nitrati: calibrazione e validazione del modello LEACHN in diversi suoli e colture foraggere
Marco Acutis, Giovanni Argenti, Salvatore Caredda, Andrea Cavallero, Giorgio Ducco, Gianfranco Fara, Carlo Grignani, Cesare Giordani, Andrea Pardini, Claudio Porqueddu, Amedeo Reyneri, Leonardo Sulas, Paolo Talamucci, Cristina Tarello e Camillo Zanchi
- 52 Produttività, conseguenze idrologiche e perdite di suolo in due sistemi foraggeri di diversa intensità nell'area del Mugello
Andrea Pardini, Giovanni Argenti, Giovanna Pazzi e Paolo Talamucci
- 58 Relazioni tra parte aerea, parte ipogea, traspirazione e assorbimento radicale del lupino dolce (*Lupinus albus* L. cv. «Multitalia»)
Celestino Ruggiero e Massimo Fagnano
- 72 Influenza dei fattori ambientali e della disponibilità di azoto sulla concentrazione di nitrati nella lattuga (*Lactuca sativa* L.)
Giovanni Lacertosa, Francesco Montemurro, Guido Capotorti e Domenico Palazzo
- 78 Relazioni tra parte aerea, parte ipogea, traspirazione ed assorbimento radicale del cece (*Cicer arietinum* L.)
Celestino Ruggiero e Massimo Fagnano
- 89 Sistemi pascolivi nell'Italia centro-meridionale
Andrea Pardini e Francesco Rossini
- 101 Combinazione delle risorse pascolive nei sistemi foraggeri e loro ruolo nei sistemi multiuso
Paolo Talamucci

- 108 Metodi e tecniche di analisi nella valutazione del valore alimentare dei foraggi
Andrea Canale
- 118 Confronto varietale di specie graminacee microterme per tappeti erbosi. Nota I: tempo di emergenza, velocità di crescita, densità, larghezza e contenuto azotato delle lamine fogliari
Marco Volterrani, Nicola Grossi, Monica Gaetani, Guido Pardini e Sergio Miele
- 127 Scelte varietali in loietto inglese (*Lolium perenne* L.), poa pratense (*Poa pratensis* L.), festuca rossa (*Festuca rubra* L.) e festuca arundinacea (*Festuca arundinacea* Schreb.) per il loro utilizzo nella conduzione di tappeti erbosi ad uso tecnico, sportivo e ricreativo in centro Italia
Fabio Veronesi, Mario Falcinelli, Bruno Lucaroni e Luigi Russi
- 135 In memoria del Professor Lucio Toniolo
Luigi Giardini

C O N T E N T S

- 1 *Parrini P.* - The control of the reproductive systems in plant breeding
- 3 *Cavallini A.* - Use of cytophotometric methods to study interspecific hybridization
- 8 *Simeone R. and Blanco A.* - Chromosome banding techniques to study interspecific hybridization
- 14 *Tavoletti S., Barcaccia G. and Veronesi F.* - Cytological and histological analysis as a tool to study the reproductive system
- 18 *Barcaccia G., Tavoletti S., Rosellini D. and Falcinelli M.* - Cellular, morphological and molecular markers for studying the reproductive systems of *Poa pratensis* L. and *Medicago* spp.
- 27 *Varotto S., Salamini F. and Thompson R.* - Use of «*in situ*» hybridization for the analysis of reproductive systems
- 33 *Acutis M., Argenti G., Caredda S., Cavallero A., Ducco G., Fara G., Grignani C., Pardini A., Porqueddu C., Reyneri A., Sulas L., Talamucci P. and Zanchi C.* - Modelling percolation of water: calibration and validation of CREAMS and LEACHW codes in different soils and forage crops
- 42 *Acutis M., Argenti G., Caredda S., Cavallero A., Ducco G., Fara G., Grignani C., Giordani C., Pardini A., Porqueddu C., Reyneri A., Sulas L., Talamucci P., Tarello C. and Zanchi C.* - Modelling leaching of nitrates: calibration and validation of LEACHN model in different soils and forage crops
- 52 *Pardini A., Argenti G., Pazzi G. and Talamucci P.* - Productivity, hydrological consequences and soil losses of two forage systems of different intensity in the Mugello Area (Central Italy)
- 58 *Ruggiero C. and Fagnano M.* - Relations between shoot, root, water transpiration and root uptake of sweet lupin (*Lupinus albus* L.)
- 72 *Lacertosa G., Montemurro F., Capotorti G. and Palazzo D.* - Effects of environmental parameters and nitrogen fertilization on nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.)
- 78 *Ruggiero C. and Fagnano M.* - Relations between shoot, roots, transpiration and root water uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.)
- 89 *Pardini A. and Rossini F.* - Grazing systems in Central-Southern Italy
- 101 *Talamucci P.* - Combination of pastoral resources in forage systems and their role in multipurpose systems
- 108 *Canale A.* - Methods and analytical procedures for assessing the feeding value of forages
- 118 *Volterrani M., Grossi N., Gaetani M., Pardini G. and Miele S.* - Varietal comparison of cool season turfgrasses. Note I: emergence time, growth rate, density, leaf blade width and nitrogen content
- 127 *Veronesi F., Falcinelli M., Lucaroni B. and Russi L.* - Within species variation in cool season grasses grown for turf in Central Italy
- 135 *Giardini L.* - In memory of Professor Lucio Toniolo

Modellizzazione della percolazione profonda dell'acqua nel terreno: calibrazione e validazione dei codici CREAMS e LEACHW in diversi suoli e colture foraggere ⁽¹⁾

Marco Acutis, Giovanni Argenti, Salvatore Caredda, Andrea Cavallero, Giorgio Ducco, Gianfranco Fara, Carlo Grignani, Andrea Pardini, Claudio Porqueddu, Amedeo Reyneri, Leonardo Sulas, Paolo Talamucci e Camillo Zanchi ⁽²⁾

Riassunto

In tre areali italiani (pianura piemontese, conca interappenninica toscana, pianura irrigua sarda) e su quattro diversi tipi di terreno si sono calibrati e validati i codici CREAMS (modello a serbatoio) e LEACHW (basato sulla risoluzione numerica dell'equazione di Richard) relativamente alla previsione della percolazione profonda. Si è operato con lisimetri a drenaggio di grandi dimensioni. In tutte le situazioni un lisimetro era coltivato a erba medica, mentre altri con colture di ampia diffusione nell'areale (mais da trinciato integrale in Piemonte, doppio ciclo colturale (loiessa-mais da granella) in Sardegna e pascolo in Toscana e Sardegna). Le percolazioni misurate sono risultate comprese tra 100 e 300 mm anno⁻¹. I lisimetri a erba medica sono stati utilizzati per la calibrazione, i restanti per la validazione. Come parametri di calibrazione si sono usati per il modello CREAMS la capacità di ritenuta e per LEACHW i valori dei parametri a e b della funzione umidità-tensione di Campbell. Il modello CREAMS ha fornito risultati validi solo nelle situazioni in cui è stato calibrato (RMSE < 50 mm) e meno buoni in fase di validazione. LEACHW ha prodotto simulazioni di miglior qualità (RMSE < 30 mm) e i parametri che ottimizzavano le predizioni nell'erba medica sono risultati attendibili anche per le altre colture. Stimando i parametri oggetto di calibrazione da altri dati di più usuale acquisizione (granulometria, massa volumica apparente e contenuto di sostanza organica) si sono ottenuti simulazioni di adeguata attendibilità solo in Toscana.

Parole chiave: modelli idrologici, lisimetri, percolazione, sistemi foraggeri.

Summary

MODELLING PERCOLATION OF WATER: CALIBRATION AND VALIDATION OF CREAMS AND LEACHW CODES IN DIFFERENTS SOILS AND FORAGE CROPS

CREAMS (capacitance type approach) and LEACHW (Richard's equation approach) codes has been validated and calibrated in three Italian environments (Piedmont, Tuscany and Sardinia), using 4 types of soil ranging from sandy-loam to clay-loam. A set of large drainage lysimeters has been used to obtain percolation data. In all sites one lysimeter was cropped with lucerne, while the others were cropped with widespread crops in the area (maize for silage in Piedmont, double cropping (italian ryegrass-maize for grain) in Sardinia and permanent pasture in Tuscany and Sardinia). Measured percolation ranged from 100 and 300 mm y⁻¹. Lysimeters cropped with lucerne were used for calibration and the others for validation. The parameters used for calibrating the models have been the field capacity for the CREAMS model and the values of a and b of the Campbell moisture-pressure relation for LEACHW. CREAMS model showed good performance only in calibration (RMSE < 50 mm), but not in validation, LEACHW showed better performance in calibration as well as in validation (RMSE < 30 mm). Using parameters estimated from other data more easy available (particle distribution size, bulk density and organic matter content) acceptable simulation has been obtained only in Tuscany.

Key words: hydrological models, lysimeters, leaching, forage systems.

⁽¹⁾ Pubblicazione realizzata nell'ambito del progetto RAISA tematica 1,24, responsabile prof. A. Cavallero. Pubblicazione RAISA n. 3033.

⁽²⁾ Rispettivamente del Dipartimento di Agronomia, Selvicoltura e Gestione del territorio, Università di Torino il 1°, 4°, 5° 7° e 8° Autore; del Dipartimento di Agronomia e Produzioni erbacee, Università di Firenze il 2°, 8°, 12° e 13° Autore, dell'Istituto di Agronomia generale e Cotivazioni erbacee, Università di Sassari il 3° Autore; del Centro di Studio sui Pascoli Mediterranei, CNR-Sassari il 6°, 9° e 11° Autore.

Al Dott. Acutis, coordinatore, è da attribuirsi l'elaborazione collegiale dei dati e l'impostazione del lavoro. Gli altri Autori sono responsabili dei dati per le rispettive località. La stesura del testo è frutto di lavoro collegiale.

Introduzione

La quantificazione dell'impatto ambientale dei sistemi colturali su scala territoriale, in assenza di accertamenti specifici, è possibile solo attraverso la modellizzazione matematica dei flussi di energia e di materia in ingresso, uscita ed entro il sistema in esame.

Di primaria importanza risulta l'analisi dei flussi idrici, che rappresentano il principale veicolo di rilascio di nutrienti e fitofarmaci nell'ambiente e condizionano la più parte dei processi biologici nel suolo (VanCoster *et al.*, 1995).

Nei modelli la dinamica dell'acqua nel suolo è interpretata attraverso due meccanismi principali: il meccanismo a serbatoi e quello basato sull'equazione di Richard. I modelli a serbatoi suddividono il terreno in strati omogenei, caratterizzati da una determinata capacità di trattenuta dell'acqua. In seguito ad apporti meteorici o irrigui l'acqua può approfondirsi da uno strato al successivo solo nel caso venga superata la capacità di trattenuta di un certo strato. Questo tipo di approccio è semplificato della dinamica dei flussi idrici, trascurando il fatto che non esiste una soglia di mobilità dell'acqua, ma solo un livello di umidità in cui il flusso non è più macroscopicamente accertabile; tale livello di umidità è ben definibile in suoli sciolti, mentre la sua definizione in terreni argillosi è alquanto incerta. Con i modelli a serbatoi risulta inoltre difficoltoso tenere conto della presenza di falde freatiche. Il vantaggio principale di questa impostazione è dato da un numero contenuto di parametri fisici del suolo necessari affinché il processo possa essere simulato.

Alcuni modelli di questo tipo (Addiscott, 1977) sono stati perfezionati definendo due soglie di umidità, di cui la prima corrispondente alla capacità di trattenuta idrica di un singolo strato e la seconda a un valore di umidità del suolo a cui i flussi idrici assumono valore insignificante. Tra i due livelli di umidità detti, è possibile una redistribuzione dell'acqua tra gli strati, a velocità proporzionale al contenuto di umidità del suolo.

L'equazione di Richard offre un'interpretazione su base fisica del movimento dell'acqua nel suolo. Partendo dall'equazione di Darcy e dalla conservazione della massa si giunge alla seguente formulazione del flusso:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] - U(z, t)$$

con:

θ = contenuto volumetrico di acqua ($m^3 m^{-3}$);

H = pressione idrostatica (mm);

K = conducibilità idraulica ($mm d^{-1}$);

t = tempo (d);

z = profondità (mm);

U = acqua persa nel tempo t alla profondità z per traspirazione (d^{-1}).

Il flusso risulta proporzionale alla differenza di potenziale idraulico e a un coefficiente di conducibilità dipendente dal contenuto idrico del suolo. Tale approccio implementa nei modelli un meccanismo deterministico sicuramente assai più prossimo alla realtà di quello dei modelli a serbatoi. L'impiego dell'equazione di Richard pone tuttavia diversi problemi, richiedendo la conoscenza delle relazioni funzionali tra contenuto idrico,

potenziale matriciale e valore di conducibilità idraulica. L'equazione ha risoluzioni analitiche solo in casi particolari e comporta quindi l'impiego di metodi numerici complessi e comunque sempre approssimati; non viene tenuto conto né dell'isteresi né di vie preferenziali per il flusso idrico eventualmente presenti; non considera che nei macropori e nei micropori si registrano comportamenti idrologici che spesso, e in particolare nei suoli argillosi, danno luogo a distinti «domini di flusso».

Sono in genere del tipo a serbatoi i modelli orientati al «management» mentre i modelli di ricerca implementano sempre una procedura idonea alla risoluzione dell'equazione di Richard. I modelli talvolta implementano entrambi gli approcci a diverso livello di accuratezza.

Tra i modelli che gestiscono i flussi di acqua nel terreno vanno ricordati i modelli di «management» EPIC (Sharpley e Williams, 1990), GLEAMS (Leonard *et al.*, 1986), CERES nelle sue varie versioni e CROPSYST (Stockle e Nelson, 1994) che sono esclusivamente di tipo a serbatoi. Il modello CREAMS (Knisel, 1980) oltre al meccanismo a serbatoi, implementa in opzione un'approccio semplificato che approssima un comportamento dell'acqua secondo l'equazione di Richard; il modello DAISY infine (Hansen, 1991), implementa una soluzione completa di tale equazione.

Tra i modelli di ricerca vanno ricordati LEACHW (componente idrologica di LEACHM – Hutson e Wagenet, 1992), che oltre all'equazione di Richard risolve in ambito monodimensionale, implementa anche la procedura a serbatoi proposta da Addiscott (l.c.), MACRO (Jarvis, 1994), monodimensionale con due domini di flusso corrispondenti alla macro e microporosità, il modello di Gillham *et al.* (1979), monodimensionale con isteresi, SLOPFLOW (Soeseno, 1991) con soluzione in ambito bidimensionale e particolarmente orientato a problemi di terreno in pendenza e FLOW30 (Paniconi *et al.*, 1994), tridimensionale e con più domini di flusso.

Tra questi si sono scelti i modelli CREAMS e LEACHW, quali tipici rappresentanti dei modelli di management e di ricerca, di ampia diffusione e oggetto di parecchie validazioni (ad es. Trevisan *et al.*, 1994, Jemison *et al.*, 1994); il secondo modello è comunque, per la sua ampia elasticità, applicabile anche in situazioni agricole reali.

Materiali e metodi

Per la calibrazione e la validazione dei modelli si sono usati dati di percolazione ottenuti con lisimetri a drenaggio. Si è operato per il biennio 1993-94 in tre località differenti: Carmagnola (TO), Bonassai (SS) e Borgo S. Lorenzo (FI), rappresentative rispettivamente della pianura padana occidentale, della conca interappenninica toscana e della pianura sarda irrigua. A Carmagnola e a Bonassai i lisimetri misuravano $3 \times 2,8$ m ed erano profondi rispettivamente 2 e 1 m; a Borgo S. Lorenzo 1×1 m, con profondità di 1 m.

Sono state esaminate 4 tipologie di suolo (2 a Carmagnola), che coprono una gamma di tessitura variabile da franco-sabbiosa a franco-argillosa; i suoli appaiono notevolmente differenziati per quantità di acqua disponibile, conducibilità idraulica alla saturazione e presenza di scheletro (tab. 1). I dati termopluviometrici e i valori di evapotraspirazione potenziale calcolati per i tre siti sono riportati in figura 1.

TABELLA 1 - Caratteristiche dei terreni.

TABLE 1 - Soils characteristics.

Località	Scheletro (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Sostanza organica (%)	Class. USDA	Capacità di trattenuta (% peso)	Punto di appassimento (% peso)	Massa volumica apparente (t m ⁻³)	Conducibilità alla saturazione (mm h ⁻¹)
Carmagnola, franco-sabbioso	assente	68,7	26,8	4,5	1,6	FS	22,8	5,2	1,35	9,0
Carmagnola franco	assente	52,3	31,7	16,0	1,2	F	20,0	7,5	1,39	6,0
Borgo S. Lorenzo	29,6	28,7	36,0	35,3	0,8	FA	35,8	12,1	1,20	0,2
Bonassai	7,6	38,9	24,8	36,3	2,8	FA	27,1	14,3	1,45	10,0

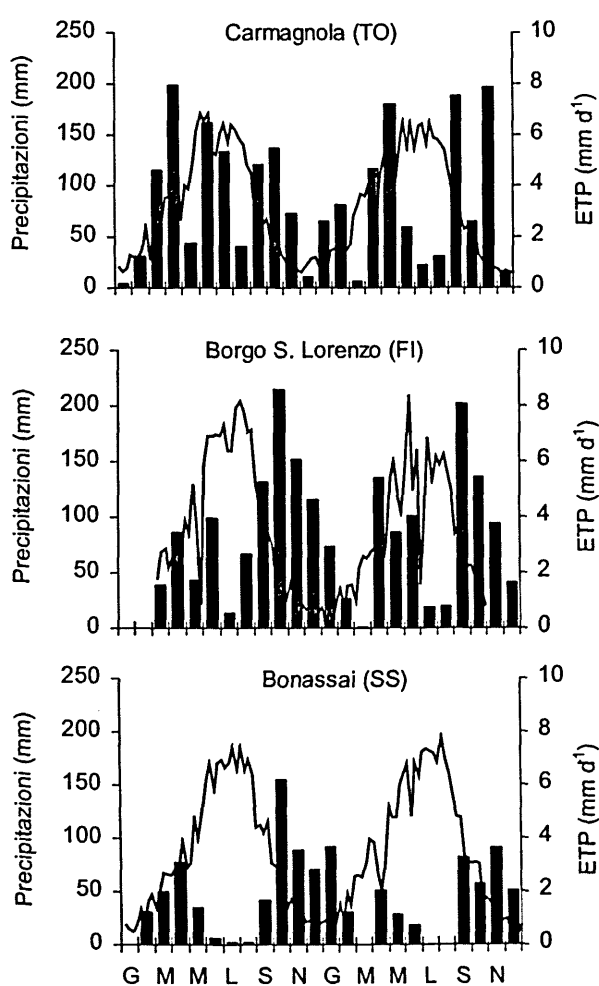


Fig. 1 - Precipitazioni (istogrammi) e evapotraspirazione potenziale (linea continua) per i tre siti.

Fig. 1 - Rainfall (histograms) and potential evapotranspiration (continuous line) in experimental sites.

In tutte le località un lisimetro è stato sempre coltivato a erba medica, mentre in altri erano presenti colture tipiche dei sistemi foraggeri degli ambienti in esame. Tali colture sono state il mais da trinciato integrale

a Carmagnola; il pascolo polifita a Borgo S. Lorenzo; la successione annuale dell'erbaio di loiessa e di mais da granella e il pascolo a base di specie annue autorisemianti a Bonassai. In tabella 2 sono riportate le principali note di tecnica culturale.

I modelli utilizzati sono stati i seguenti:

a) CREAMS

Si compone di 4 sottomodelli: idrologia, erosione, nutrienti e pesticidi. In questa sede si darà descrizione del sottomodello idrologico, escludendo da essa la parte relativa alle acque di scorrimento superficiale, già analizzata da Acutis *et al.* (1994).

Il sottomodello idrologico simula il ruscellamento superficiale, la distribuzione dell'acqua infiltrata nel suolo, la percolazione, l'assorbimento di acqua da parte delle radici, l'evapotraspirazione e l'eventuale presenza e fusione della neve.

L'evapotraspirazione potenziale (ETP) viene calcolata giornalmente a partire da dati di temperatura e radiazione globale seguendo un approccio simile a quello di Makkink (1957). I dati giornalieri sono ottenuti dai valori medi mensili, richiesti come input dal modello, applicando le serie di Fourier. L'ETP viene ripartita nelle sue due componenti, evaporativa e traspirativa, in funzione del LAI attuale della coltura. La componente evaporativa viene eventualmente ridotta rispetto al suo valore potenziale utilizzando l'approccio proposto da Ritchie (1972), mentre quella traspirativa viene ridotta in funzione del LAI e del livello di umidità del terreno. La crescita di radici e colture viene descritta con funzioni empiriche del LAI, richiesto in input.

b) LEACHM

Si compone di diversi sottomodelli (idrologia, dinamica dell'azoto, pool microbiologici nel suolo, specie chimiche diverse, fitofarmaci). In questo lavoro viene considerato il sottomodello idrologico, denominato LEACHM. Per il movimento dell'acqua nel suolo è stata utilizzata una risoluzione monodimensionale alle differenze finite dell'equazione di Richard.

Per la definizione della funzione tensione-umidità

TABELLA 2 - *Tecnica colturale adottata (valori medi dei due anni).*

TABLE 2 - Notes on management (biennial average).

Località	Coltura	Semina	Utilizzazioni	Irrigazione (m anno ⁻¹)
Carmagnola franco-sabbioso	erba medica	2.9.91	5 tagli anno ⁻¹	0
	mais	17.5.93 23.4.94	7.9.93 22.8.94	60
Carmagnola franco	erba medica	2.9.91	5 tagli anno ⁻¹	0
Borgo S. Lorenzo	erba medica	10.9.91	4 tagli anno ⁻¹	0
	pascolo	12.9.91	pascolamento da IV a XI	0
Bonassai	erba medica	26.10.92	6 tagli anno ⁻¹	800
	mais + loiessa	22.5.93 + 11.11.93	30.9.93 + 4.5.94	790
	pascolo	26.10.92	2 ^a data pascolamento da XI a V	0

è usata la funzione di Campbell (1974) nella versione modificata secondo Hutson e Cass (1987) allo scopo di eliminarne la discontinuità che presentava ad alti valori di umidità del suolo:

$$h = \frac{a(1 - \theta/\theta_s)^{1/2} (\theta_c/\theta_s)^{-b}}{(1 - \theta_c/\theta_s)^{1/2}}$$

- a = tensione di ingresso dell'aria nel terreno (kPa);
- $\theta_c = 2b\theta_s/(1 + 2b)$; umidità volumetrica (m³ m⁻³) al punto di intersezione tra la funzione esponenziale e quella parabolica;
- b = parametro empirico (adimensionale);
- h = pressione (kPa);
- θ_s = umidità volumetrica alla saturazione (m³ m⁻³).

Per la definizione della conducibilità idraulica in funzione del contenuto in acqua del terreno viene utilizzata una funzione proposta dallo stesso Campbell (l.c.):

$$K(\theta) = K_s (\theta/\theta_s)^{2b+2+p}$$

- K_s = conducibilità idraulica alla saturazione (mm d⁻¹);
- $K(\theta)$ = conducibilità idraulica all'umidità θ ;
- p = parametro di interazione tra i pori, posto nel lavoro sempre uguale a 1;
- b = parametro empirico (adimensionale).

Leachw fornisce 5 equazioni di regressioni diverse per ottenere i parametri a e b considerando dati di granulometria, di contenuto in sostanza organica e di massa volumica apparente; tuttavia ne viene sconsigliato l'uso a causa di un rilevante grado di approssimazione insito in questo tipo di metodi basati su calibrizioni empiriche.

La conducibilità idraulica degli strati superficiali determina la velocità di infiltrazione degli apporti idrici; per le condizioni di contorno allo strato inferiore è possibile imporre: la presenza di una falda freatica

a profondità fissa o variabile, la presenza di uno strato impermeabile, la condizione di gradiente idraulico unitario o la simulazione di un lisimetro a drenaggio, nel quale la percolazione è possibile solo quando l'ultimo strato è in saturazione. L'evapotraspirazione potenziale non viene calcolata dal modello, ma deve essere fornita in input come totale settimanale; nel caso specifico per il calcolo dell'ETP si è usata la formula di Penman modificata dalla FAO (Doorenbos e Pruitt, 1977). Il modello provvede poi alla ripartizione in valori giornalieri dividendo per 7 il totale fornito in input e, all'interno di ogni giorno, a un'ulteriore ripartizione in periodi orari secondo una funzione sinusoidale, con picco alle ore 13 solari. Il calcolo dell'evapotraspirazione effettiva avviene ripartendo l'evapotraspirazione potenziale in una quota di traspirazione e una di evaporazione proporzionalmente a un fattore di copertura del suolo variabile tra 0 e 1 (0 corrisponde al suolo nudo, 1 a totale copertura del suolo da parte della vegetazione). Per ogni strato, in funzione della percentuale di presenza dell'apparato radicale, viene calcolato il volume di acqua assorbito dalle radici in condizioni di rifornimento idrico ottimale. La quantità di acqua effettivamente asportata viene posta pari alla massima quantità che potrebbe attraversare lo spessore di 0,01 m di terreno nell'unità di tempo considerata, valutata calcolando il flusso in funzione della conducibilità idraulica e del gradiente di potenziale. In ogni caso non è possibile superare il volume assorbibile dalle radici in quello strato in condizioni di rifornimento idrico ottimale.

Il ruscellamento superficiale non viene gestito; tuttavia qualora il modello preveda ancora la presenza di acqua non infiltrata in coincidenza di un nuovo evento piovoso, tale acqua viene considerata come non più facente parte del sistema e quindi assimilabile a un eventuale ruscellamento; nel caso in esame, la procedura che prevede l'allontanamento dell'acqua non infiltrata è stata disabilitata, essendo le pareti dei lisimetri fuoriuscenti di 0,1 m dal terreno.

La crescita delle colture e degli apparati radicali viene simulata attraverso semplici modelli empirici.

– Tecniche di calibrazione e validazione

Si è scelta quale coltura di calibrazione quella dell'erba medica, comune a tutti i terreni considerati. Su questa coltura si sono ottenuti per calibrazione i valori dei parametri propri di ciascun modello che consentivano di ottenere il valore minimo del «root mean square error – RMSE» (Loague e Green, 1991):

$$RMSE = (\Sigma (O-P)^2)^{1/2}$$

P = valore predetto dal modello di percolazione cumulata (mm);

O = valore misurato.

I valori così ottenuti sono stati applicati alle altre colture per predire la percolazione, ottenendo così una validazione dei parametri trovati. A Carmagnola, per la coltura del mais su terreno franco, a causa di un malfunzionamento del lisimetro relativo, non si è potuto procedere alla validazione.

Per il modello CREAMS l'unico parametro oggetto di calibrazione è stata la capacità di trattenuta. Il modello è stato utilizzato per calcolare la percolazione in corrispondenza di un'ampia gamma di valori di capacità di trattenuta.

Per il modello LEACHW, disponendo di dati misurati (in laboratorio, con permeametro a carico variabile) della conducibilità idraulica alla saturazione, i parametri oggetto di calibrazione sono stati a e b della funzione di Campbell. Si è proceduto con una tecnica di ricerca a griglia, calcolando il valore di RMSE per ogni punto della griglia; i valori di a sono stati fatti variare tra -0,1 e -20 kPa e quelli del parametro b tra 0,1 e 20, con lo stesso passo per entrambi i parametri, per un totale di 441 esecuzioni di LEACHW per ogni terreno.

Infine, i risultati della calibrazione, per entrambi i modelli, sono stati confrontati con quelli ottenibili utilizzando alcuni dei metodi che consentono la stima dei parametri idrologici che sono stati oggetto di calibrazione a partire dalle caratteristiche tessiture, dalla

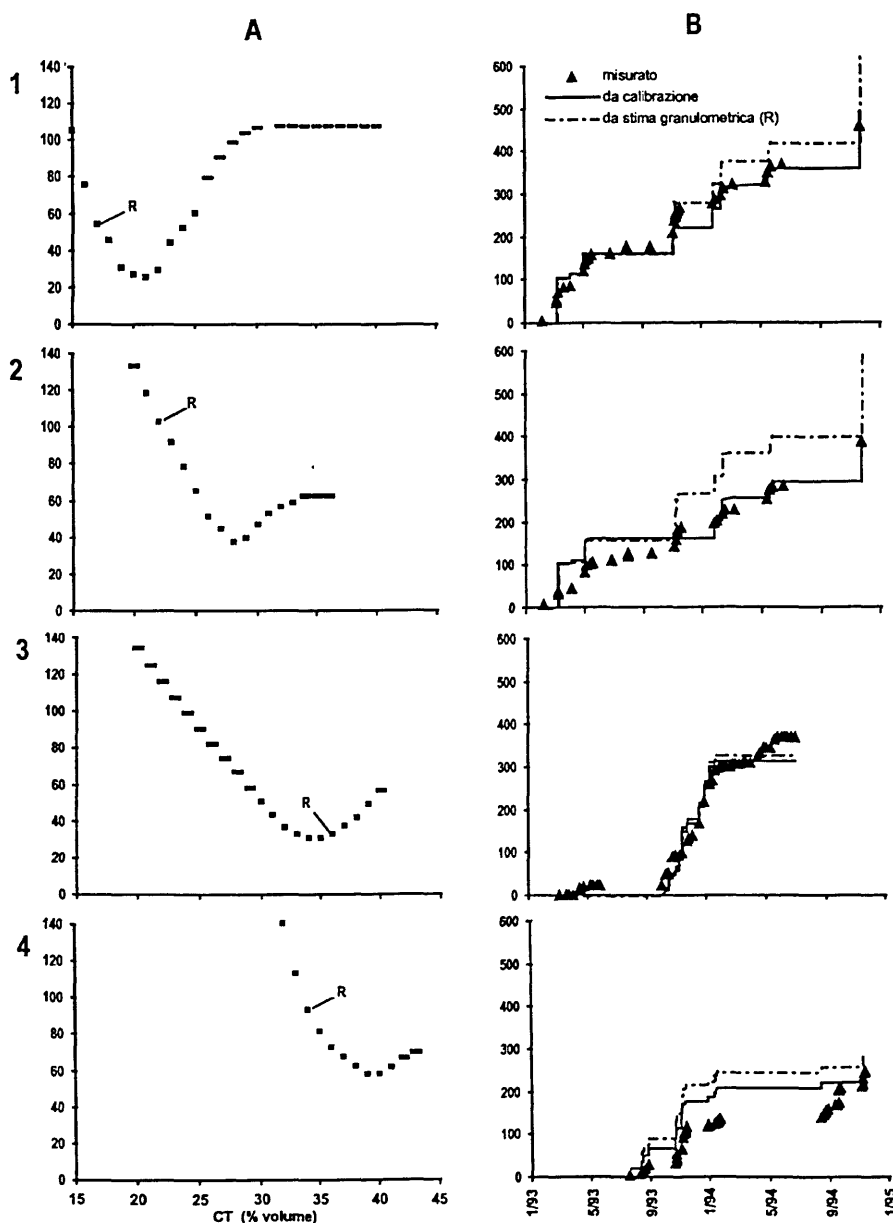


Fig. 2 - Calibrazione del modello CREAMS su erba medica per il percolato cumulato. 1) Carmagnola, terreno franco-sabbioso; 2) Carmagnola, terreno franco; 3) Borgo S. Lorenzo; 4) Bonassai. Grafici A: valori dell'indice RMSE al variare della capacità di trattenuta (CT). Il ramo di curva evidenziato con quadrati corrisponde ai valori di CT stimabili empiricamente dalla granulometria, considerandone anche la variabilità spaziale (vedi testo). Il valore indicato con R corrisponde alla CT stimata secondo Rawls e Brakensiek (1985). Grafici B: confronto tra valori misurati e predetti dal modello dopo calibrazione e utilizzando la stima di Rawls e Brakensiek (1985).

Fig. 2 - CREAMS model calibration on cumulated drainage from lucerne. 1) Carmagnola, sandyloam; 2) Carmagnola, loam; 3) Borgo S. Lorenzo; 4) Bonassai. Figures A: RMSE values as a function of field capacity (CT). The squares on the curve show the range of CT values estimated from particle size distribution, considering also spatial variability (see text). R shows the Rawls & Brakensiek (1985) estimate. Figures B: comparison between values measured and predicted after calibration or using the Rawls & Brakensiek (1985) estimate.

massa volumica apparente e dal contenuto in C organico dei diversi terreni. Sono stati utilizzati i 2 metodi di Hutson (1986), quello di Thommasson e Carter (1989) e quello di Rawls e Brakensiek (1985). Considerando anche la variabilità spaziale dei dati di partenza e la relativa incertezza nella loro determinazione, usando dati bibliografici reperibili in Warrick e Nielsen (1980), mediante una simulazione di tipo Monte Carlo si è determinata una gamma di possibili valori dei parametri stimati.

Risultati e discussione

In figura 2 sono riportati, per il modello CREAMS, i risultati delle calibrazioni effettuate. Scegliendo il va-

lore ottimale di capacità di trattenuta (CT), si sono riscontrati valori di RMSE sempre inferiori a 50 mm (fig. 2A), ma solo nei 2 terreni di Carmagnola e Borgo S. Lorenzo i valori di RMSE, dell'ordine di 30 mm, hanno consentito buona aderenza dei dati acquisiti sperimentalmente con quelli stimati dal modello (fig. 2B). Le capacità di trattenuta stimate dalla granulometria coprono gamme decisamente ampie e che comprendono sempre il valore ottimale ottenuto da calibrazione, ma la stima secondo Rawls e Brakensiek (l.c) (scelta per la sua ampia diffusione) ottenuta in corrispondenza dei dati granulometrici effettivamente misurati, permette di ottenere simulazioni precise dei volumi percolati solo a Borgo S. Lorenzo. Nelle altre località la stima appare sempre inficiata da rilevanti errori. È da notare inoltre che i valori di capacità di trattenuta, distano in tutti i

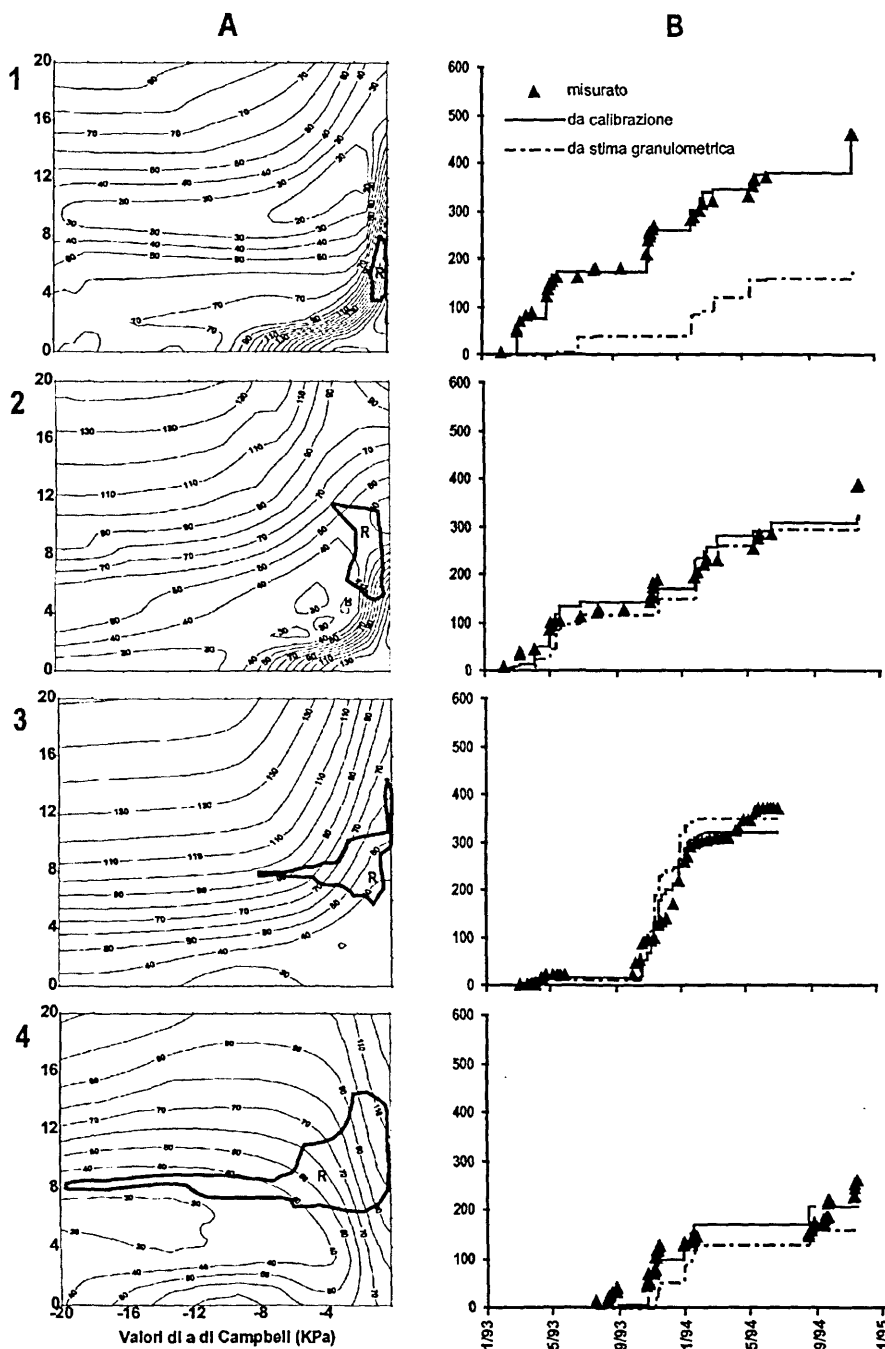


Fig. 3 - Calibrazione del modello LEACHW su erba medica per il percolato cumulato. 1) Carmagnola, terreno franco-sabbioso; 2) Carmagnola, terreno franco; 3) Borgo S. Lorenzo; 4) Bonassai. Grafici A: mappe a curve di livello dei valori dell'indice RMSE ottenuti al variare dei parametri a e b della funzione umidità-tensione di Campbell. L'area evidenziata con contorno nero indica i valori di a e b stimabili empiricamente dalla granulometria, considerando anche la variabilità spaziale (vedi testo). Il valore indicato con R corrisponde ai valori di a e b stimati secondo Rawls e Brakensiek (1985). Grafici B: confronto tra valori misurati e predetti dal modello dopo calibrazione e utilizzando la stima di Rawls e Brakensiek (1985).

Fig. 3 - LEACHW model calibration on cumulated drainage from lucerne. 1) Carmagnola, sandyloam; 2) Carmagnola, loam; 3) Borgo S. Lorenzo; 4) Bonassai. Figures A: contour maps of RMSE values at various a and b values of the Campbell's moisture-pressure function. Black line shows the range of a and b values estimated from particle size distribution, considering also spatial variability (see text). R shows the Rawls & Brakensiek (1985) estimate. Figures B: comparison between values measured and predicted after calibration or using the Rawls & Brakensiek (1985) estimate.

casi notevolmente dai valori stimabili, ponendo la capacità di trattenuta a tensioni comprese tra -20 e -30 kPa, misurati con l'apparecchio di Richard; ciò indicherebbe che con la calibrazione si compensano gli effetti di altri parametri stimati con insufficiente precisione dal modello, quali quelli relativi all'evapotraspirazione potenziale e reale.

Per il modello LEACHW (fig. 3A) i risultati della calibrazione appaiono ottimi in tutti i terreni conside-

rati, con valori di RMSE sempre inferiori a 30 mm. Le stime granulometriche (fig. 3B) non comprendono mai il valore ottimale di calibrazione, tuttavia permettono di ottenere simulazioni della percolazione di sicuro interesse in 3 dei 4 terreni. La simulazione appare del tutto discostata dai dati misurati per il terreno franco-sabbioso di Carmagnola.

I risultati della validazione dei modelli sono riportati in figura 4. L'impiego dei valori ottenuti da calibra-

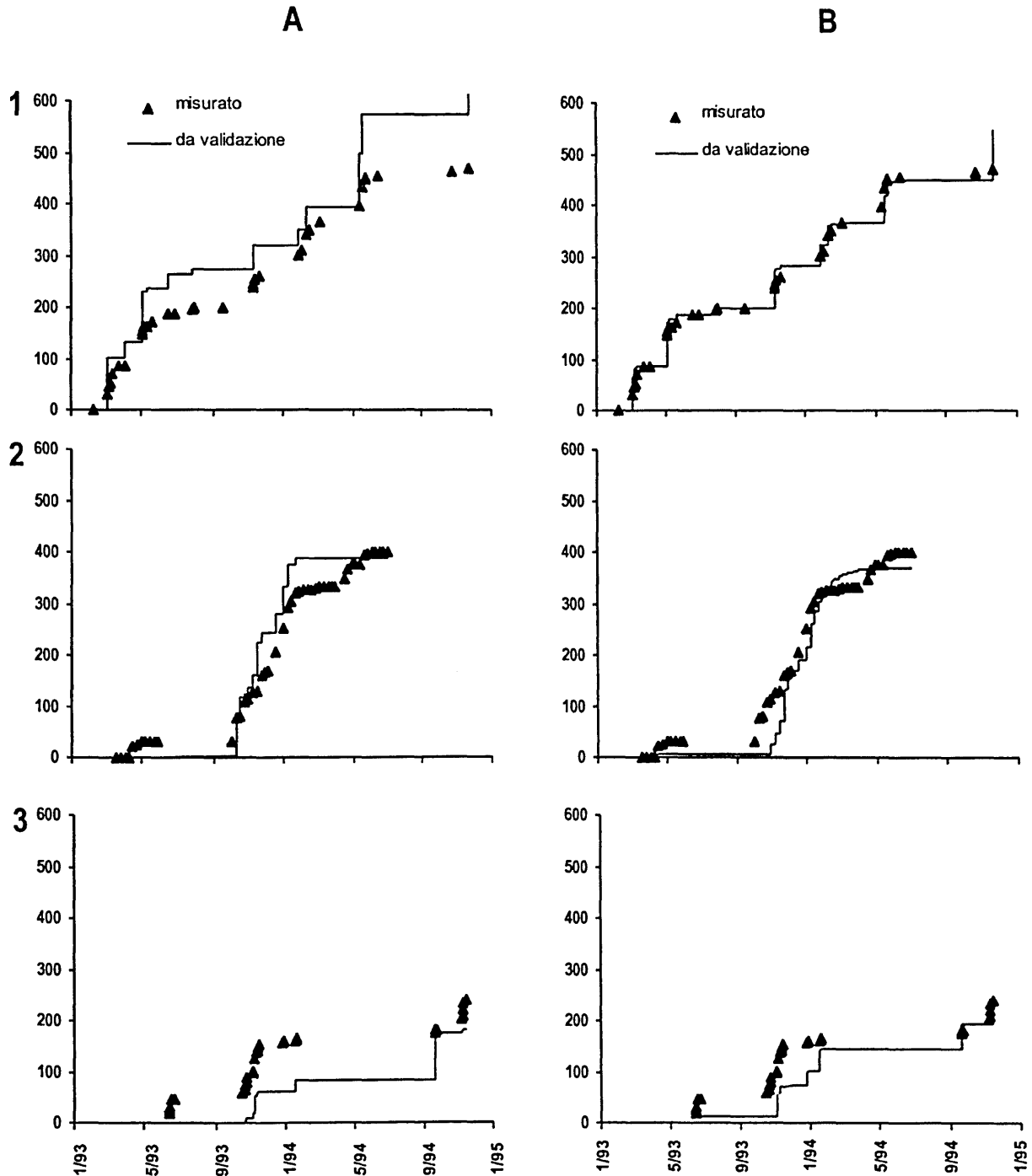


Fig. 4 - Validazione del modello CREAMS (Grafici A) e LEACHW (Grafici B). 1) Mais a Carmagnola, terreno franco-sabbioso; 2) Pascolo a Borgo S. Lorenzo; 3) Mais e loiessa a Bonassai.

Fig. 4 - Validation of the CREAMS model (Figure A) and LEACHW (Figure B). 1) Maize at Carmagnola, sandy-loam soil; 2) Pasture at Borgo S. Lorenzo; 3) Maize and Italian ryegrass double cropping system at Bonassai.

zione su erba medica alle altre colture (fig. 4) non viene presentato per il pascolo migliorato a Bonassai, ove i bassissimi valori di percolazione registrati (peraltro regolarmente previsti dai modelli) rendono poco significativo il confronto.

Le stime ottenute con il modello CREAMS (fig. 4A) presentano scostamenti rilevanti dai dati misurati a Carmagnola e a Bonassai, mentre risultano accettabili a Borgo S. Lorenzo. Il fatto pare da attribuirsi all'imprecisione della stima dei consumi idrici da parte delle colture, dovuta a procedure di calcolo dell'ETP e dell'ETR eccessivamente semplificate. Infatti eventuali approssimazioni nel calcolo dei consumi idrici possono venire compensate in fase di calibrazione dalla scelta di valori distorti di capacità di trattenuta, consentendo così buone simulazioni. Ne consegue che in presenza di colture con dinamiche dei consumi idrici diverse da quella della coltura di riferimento, ad esempio il mais rispetto all'erba medica, i valori trovati per calibrazione possano risultare inadeguati.

Per quanto riguarda LEACHW (fig. 4B) i risultati della validazione sono di indubbio interesse in tutte le località. Ciò indica che i valori di calibrazione dei coefficienti rappresentano meglio parametri fisici del terreno e che non sono distorti a compensazione di altri parametri non oggetto di calibrazione; indica inoltre che il modello rappresenta meglio le diverse dinamiche dei flussi evapotraspirativi.

Conclusioni

Data la notevole importanza di una corretta stima dei flussi idrici, necessaria per la modellizzazione di parametri di rilevante impatto ambientale (quali in particolare i nitrati) il modello CREAMS non pare fornire prestazioni di accettabile precisione nei terreni considerati, in particolare per le tecniche semplificate di stima dell'evapotraspirazione, ma anche per l'inadeguatezza dell'approccio a serbatoi implementato. Il suo uso pare dunque limitato a quello originariamente previsto dagli Autori, cioè di strumento per il confronto di alternative di management. Il modello LEACHW, al contrario è in grado di fornire previsioni di buona validità in situazioni molto diversificate, e quindi di essere utilizzato validamente in studi di tipo territoriale. Le migliori prestazioni del modello LEACHW sono da attribuirsi alla possibilità di utilizzare stime di evapotraspirazione a scelta dell'utente e a una miglior rappresentazione dei flussi idrici nel sistema terreno-pianta-atmosfera.

Rimane in ogni caso aperto il problema della stima dei parametri idrologici dei terreni nel caso frequente in cui questi non vengano misurati e non siano disponibili altre acquisizioni sperimentali sulle quali calibrare i modelli: le loro stime, a partire da granulometria e altri dati di più comune acquisizione, non sempre sono parse idonee a garantire simulazioni corrette nelle situazioni esaminate. L'utilizzazione diffusa sul territorio di questi modelli sembrerebbe dunque richiedere particolare cura nella definizione dei parametri idrologici del suolo e la loro calibrazione nelle situazioni pedo-climatiche e colturali di maggior interesse.

Ricevuto il 21.9.1996

Bibliografia

- ACUTIS, M., BULLITTA, P., CAREDDA, S., CAVALLERO, A., GIORDANI, C., GRIGNANI, C., PARDINI, A., PORQUEDDU, C., REYNERI, A., ROGGERO, P.P., SULAS, L., TALAMUCCI, P., ZANCHI, C., 1994. *Validazione del modello CREAMS nella previsione del ruscellamento superficiale e dell'erosione da colture foraggere*. Riv. di Agron., XXVIII, 2, 149-159.
- ADDISCOTT, T.M., 1977. *A simple computer model for leaching in structured soils*. J. Soil Science., 28, 554-563.
- CAMPBELL, G.S., 1974. *A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data*. Soil Science, vol. 117, 6, 311-314.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O., 1977. *Crop Water requirements*. FAO irrigation and drainage paper n. 24, 144 pp.
- GILLHAM, R.W., KLUTE, A., HEERMANN, D.F., 1979. *Measurement and numerical simulation of hysteretic flow in a heterogeneous porous medium*. Soil Sci. Am. J., 43, 1061-1067.
- HANSEN, S., 1991. *Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the danish simulation model DAISY*. Fertilizer research, 27, 245-259.
- HUTSON, J.L., 1986. *Water retentivity of some South African soils in relation to particle size criteria and bulk density*. S. Afr. J. Plant Soil, 3, 151-155.
- HUTSON, J.L., CASS, A., 1987. *A retentivity function for use in soil-water simulation models*. J. Soil Sci., 38, 105-113.
- HUTSON, J.L., WAGENET, R.J., 1992. *LEACHM. Leaching Estimation and Chemistry Model. A process-based model of water and solute movement, transformation, plant uptake and chemical reaction in the unsaturated zone*. Dept. of Soil, Crop and Atmospheric Sciences. Research Series no. 929-3. New York, Cornell University.
- JARVIS, N., 1994. *The MACRO model. Technical description and sample simulation*. Dept. of Soil Science, Reports and dissertation 19, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 51.
- JEMISON, J.M., JABRO, J.D., FOX, R.H., 1994. *Evaluation of LEACHM: I. Simulation of drainage, bromide leaching and corn bromide uptake*. Agron. J., 86 (5), 843-851.
- KNISEL, W.G., 1980. *CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management system*. USDA, Conservation Research Report No. 26.
- LEONARD, R.A., KNISEL, W.G., STILL, D.A., 1986. *GLEAMS: groundwater loading effects of agricultural management system*. ASAE paper 86-2511.
- LOAGUE, K., GREEN, R.E., 1991. *Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application*. J. of Contaminant Hydrology, 7, 51-73.
- MAKKINK, G.F., 1957. *Testing the Penman formula by mean of lysimeter*. Journal Inst. Water Eng., 11, 277, in Costandinis, C.A., 1981, *Bonifica ed Irrigazione*, Edagricole, 629.
- PANICONI, C., FERRARIS, S., PUTTI, M., PINI, G., GAMBOLATI, G., 1994. *Three-dimensional numerical codes for simulating groundwater contamination: FLOW3D, flow in saturated and unsaturated porous media*. In Zanetti, P. (ed.): Computer techniques in environmental studies. Vol. 1. Pollution modeling. Computational Mechanics Publication. Boston.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L., 1985. *Agricultural management effects on soil water retention*. In De Coursey (ed.): Proceedings of the 1983 Natural Resources Modelling Symposium. USDA-ARS, ARS 30.
- RITCHIE, J.T., 1972. *A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover*. Water Resources Research, 8, 1024-1033.
- SHARPLEY, A.N., WILLIAMS, J.R., 1990. *EPIC - Erosion/productivity impact calculator: I. Model documentation*. USDA Technical Bulletin, 1768, 235.
- SOESENS, I., 1991. *SLOPFLOW. A two-dimensional finite element model for studying the water flow behaviour in*

- a cropped hillslope. Program documentation.* Institute of Soil Science and Plant Environment, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany, pp. 41.
- STÖCKLE, C.O., NELSON, R., 1994. *CROPSYST. Cropping System Simulation Model.* User Manual. Washington State University, 145.
- THOMASSON, CARTER (1989). In HUTSON, J.L., WAGENET, R.J., 1992. *LEACHM. Leaching Estimation and Chemistry Model. A process-based model for water and solute movement, transformation, plant uptake and chemical reaction in the unsaturated zone.* Dept. of Soil, Crop and Atmospheric Sciences. Research Series no. 92-3. New York, Cornell University.
- TRÉVISAN, D., DORIOZ, J.M., PAUTHENET, Y., 1994. *Apport d'un modèle simplifié de simulation du bilan hydrique pour l'analyse de la satisfaction du besoin en eau de prairies irriguées des Alpes internes.* Agronomie, 14, 683-696.
- VAN CLOSTER, M., VIAENE, P., DIELS, J., FEYEN, J., 1995. *A deterministic evaluation analysis applied to an integrated soil-crop model.* Ecological Modelling, 81, 183-195.
- WARRICK, A.W., NIELSEN, D.R., 1980. In Hillel, *Application of soil physics.* Academic press, New York, 385.