

Acutis, Marco; Argenti, Giovanni; Caredda, Salvatore; Cavallero, Andrea; Ducco, Giorgio; Fara, Gianfranco; Grignani, Carlo; Giordani, Cesare; Pardini, Andrea; Porqueddu, Claudio; Reyneri, Amedeo; Sulas, Leonardo; Talamucci, Paolo; Tarello, Cristina; Zanchi, Camillo (1997) *Modellizzazione della lisciviazione dei nitrati: calibrazione e validazione del modello LEACHN in diversi suoli e colture foraggere*. *Rivista di agronomia*, Vol. 31 (1), p. 42-51. ISSN 0035-6034.

<http://eprints.uniss.it/4221/>

RIVISTA DI

# AGRONOMIA

ANNO XXXI - N. 1 - GENNAIO-MARZO 1997



Consiglio Direttivo:

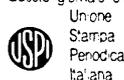
FRANCESCO BONCIARELLI - Presidente  
ENRICO BONARI - Vice Presidente  
ANGELO CALIANDRO - Membro  
GIULIANO MOSCA - Membro  
CARLO FAUSTO CERETI - Segretario tesoriere

© 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 lisciviazione dei nitrati: calibrazione e validazione del modello LEACHN in diversi suoli e colture foraggere<sup>(1)</sup>

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<sup>(2)</sup>

## Riassunto

In tre areali italiani (pianura piemontese, conca interappenninica toscana, pianura irrigua sarda) e su quattro diversi tipi di terreno si è calibrato e validato il modello LEACHN relativamente alla previsione della lisciviazione dei nitrati. 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 di loiessa e mais da granella in Sardegna e pascolo in Toscana e Sardegna. Le perdite per lisciviazione misurate sono risultate comprese tra 1 e 68 kg ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> di NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N. Come parametri di calibrazione si sono usati il tasso di mineralizzazione dell'humus e il tasso di nitrificazione dello ione ammonio, calibrati sulla coltura non azotofissatrice. Sull'erba medica, per la quale non è prevista alcuna routine per l'azotofissazione, è stata invece condotta la validazione. Dopo calibrazione, la simulazione della lisciviazione cumulata e dei totali mensili lisciviati è risultata accettabile, anche su erba medica, mentre quella dei singoli eventi è stata del tutto insufficiente. Il modello nel complesso è apparso applicabile per la predizione delle perdite di nitrati anche su scala territoriale.

*Parole chiave:* LEACHN, calibrazione, validazione, RMSE, tasso di mineralizzazione dell'humus, tasso di nitrificazione.

## Summary

### MODELLING LEACHING OF NITRATES: CALIBRATION AND VALIDATION OF LEACHN MODEL IN DIFFERENT SOILS AND FORAGE CROPS

The LEACHN model calibration and validation was realized in three Italian environments (Piedmont, Tuscany and Sardinia), using nitrate losses by drainage from 4 soil types ranging from sandy-loam to clay-loam. A set of large drainage lysimeters were used to obtain leaching data. In each location one lysimeter was cultivated with lucerne, while the others were cropped with widespread crops in the area (maize for silage in Piedmont and Sardinia and permanent pasture in Tuscany). Measured leaching losses ranged from 1 to 68 kg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. The calibration parameters were humus mineralization rate and nitrification rate. The calibration was realized on a not nitrogen fixing crop, while the validation was executed on lucerne, even if there is not a specific N-fixation subroutine in LEACHN. After calibration, the prediction of nitrate losses cumulated over the whole period (two years) or over each month resulted acceptable for all crops, while the single event prediction was totally inadequate. The LEACHN model seems to be applicable for the nitrate leaching prediction on a territorial scale.

*Key words:* LEACHN, calibration, validation, RMSE, humus mineralization rate, nitrification rate.

---

<sup>(1)</sup> Pubblicazione realizzata nell'ambito del progetto RAISA tematica I.24, responsabile prof. A. Cavallero. Pubblicazione RAISA n. 3036.

<sup>(2)</sup> Rispettivamente del Dipartimento di Agronomia, Selvicoltura e Gestione del territorio, Università di Torino il 1°, 4°, 5°, 7°, 11° e 14° Autore; del Dipartimento di Agronomia e Produzioni erbacee, Università di Firenze il 2°, 9°, 13° e 15° Autore. dell'Istituto di Agronomia generale e Cotivazioni erbacee, Università di Sassari il 3° Autore; del CNR Centro di Studio sui Pascoli Mediterranei, Sassari il 6°, 10° e 12° Autore; Istituto Agronomico per l'Oltremare, Firenze l'8° Autore.

A M. 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 lisciviazione dei nitrati rappresenta sia un danno economico per l'attività agricola sia un rilevante rischio di contaminazione degli acquiferi (Sierra, 1992; Bergström e Jarvis, 1991), che negli ultimi anni hanno presentato un livello sempre crescente e preoccupante di nitrati, soprattutto nelle zone a agricoltura più intensiva (Francani *et al.*, 1996).

La necessità di ridurre la presenza di nitrati nelle falde e di mettere a punto sistemi produttivi che possano, nel contempo, garantire adeguati livelli di reddito all'agricoltore hanno portato al sempre maggior uso di modelli matematici per la previsione della lisciviazione di nitrati in differenti terreni e condizioni pedo-climatiche (Starr *et al.*, 1979; Vachaud *et al.*, 1993; Giupponi, 1995). Infatti, stante la grande complessità del sistema in esame, solo attraverso la modellizzazione matematica si possono estendere con sufficiente attendibilità le conoscenze sperimentali acquisite a situazioni diverse da quelle specificatamente oggetto d'indagine. I modelli disponibili interpretano la dinamica dell'azoto nella pianta e nel suolo a vari gradi di complessità; una complessità crescente implica un maggior approfondimento della dinamica dell'azoto, ma anche la richiesta di un maggior numero di parametri, usualmente di difficile, se non impossibile, acquisizione sperimentale. A un livello di complessità modesto si colloca, ad esempio, il modello CREAMS (Knisel, 1980) che a partire da un valore di azoto potenzialmente mineralizzabile, ottenibile con la semplice metodica analitica proposta da Stanford e Smith (1978), oppure stimato dalla classificazione pedologica del suolo, calcola giornalmente la mineralizzazione netta in funzione di temperatura e umidità del terreno. CROPSYST (Stockle e Nelson, 1994), che è un tipico modello orientato al «management», tratta analogamente a CREAMS la mineralizzazione della sostanza organica; inoltre, con una procedura separata può prevedere anche la riorganizzazione di azoto minerale e la degradazione dei residui colturali. A un livello di maggior complessità si situa il modello LEACHN (Hutson e Wagenet, 1992) che simula la dinamica di diversi «pool» di sostanza organica, riferibili all'humus, al materiale vegetale fresco e alle deiezioni animali, e dei «pool» di azoto (urea, ammoniaca e nitrati). Tale modello implementa una risoluzione numerica dell'equazione di convezione-dispersione per la simulazione del movimento di nitrati e ammoniaca nel terreno. A un livello di ancora maggior complessità si situa DAISY (Hansen, 1991), con la simulazione anch'esso di differenti «pool»: 3 di sostanza organica a vario livello di umificazione, 2 di biomassa microbica e 2 di sostanza organica addizionata al suolo. Ogni «pool» è caratterizzato da propri valori del rapporto C/N, coefficienti di mineralizzazione, riorganizzazione e di interscambio con gli altri «pool».

Gli obiettivi del presente lavoro sono la calibrazione e la validazione del codice LEACHN, relativamente alla lisciviazione di nitrati in profondità in diversi terreni e con diverse colture foraggere. LEACHN è stato scelto come esempio di modello che pur con una buona implementazione della dinamica dell'azoto, non presenta un'eccessiva richiesta di parametri di difficile acquisizione e controllo. Il modello LEACHN gode inoltre di ampia diffusione internazionale ed è stato oggetto di diverse validazioni e calibrazioni che tuttavia hanno

fornito risultati contrastanti: ad esempio alle positive valutazioni di Lotse *et al.* (1992) e di Jemison *et al.* (1994), Ramos e Carbonel (1991) contrappongono una sostanziale disparità tra dati reali e simulati.

## Materiali e metodi

### a) Raccolta dei dati sperimentali

Per la calibrazione e la validazione del modello si sono usati dati di lisciviazione ottenuti da lisimetri a drenaggio. Si è operato nel biennio 1993-94 in tre località: Carmagnola (TO), Bonassai (SS) e Borgo S. Lorenzo (FI), rappresentative rispettivamente della pianura padana occidentale, della pianura sarda irrigua e della conca interappenninica toscana. 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 misuravano  $1,48 \times 0,87$  m, con profondità di 1 m.

Sono state esaminate 4 tipologie di suolo, di cui 2 a Carmagnola, che coprono una gamma di tessitura variabile da franco-sabbiosa a franco-argillosa. I suoli appaiono notevolmente differenziati oltre che per le caratteristiche idrologiche e di tessitura, anche per presenza di scheletro, massa volumica apparente, contenuto di sostanza organica, contenuto totale di azoto e rapporto C/N (tab. 1). In tutte le località un lisometro è stato sempre coltivato a erba medica, mentre in altri erano presenti colture tipiche dei sistemi foraggeri degli ambienti in esame: mais da trinciato integrale a Carmagnola; pascolo polifita a Borgo S. Lorenzo; successione annuale dell'erbaio di loiessa e di mais da granella e pascolo a base di specie annue autoriseminanti a Bonassai. In tabella 2 sono riportate le principali note di tecnica colturale.

L'acqua di percolazione è stata raccolta e analizzata per la concentrazione in nitrati ( $\text{NO}_3^-$ -N) ogni qualvolta si verificava il fenomeno.

### b) Il modello LEACHN

Il modello LEACHN è costituito da un assieme di procedure per il calcolo dei flussi idrici, dell'evapotraspirazione reale, dei flussi di calore, per la crescita e il conseguente assorbimento di acqua e azoto nitrico e ammoniacale da parte della pianta, per le diverse trasformazioni dell'azoto e per l'aggiustamento dei diversi tassi in funzione di temperatura e contenuto idrico. La parte idrologica del modello (flussi idrici, evapotraspirazione e percolazione) è del tutto identica a quella del modello LEACHW, di cui è data descrizione in Acutis *et al.* (1997). Qui si ricorda soltanto che la dinamica dell'acqua è basata sulla risoluzione dell'equazione di Richards in ambito monodimensionale.

Per quanto riguarda la dinamica dell'azoto i principali processi simulati sono derivati da Johnson *et al.* (1987) e sono mineralizzazione e riorganizzazione, nitrificazione, denitrificazione, volatilizzazione dell'ammoniaca e assorbimento da parte della pianta. Lo schema generale delle trasformazioni e delle perdite di N e C è riportato in figura 1.

In LEACHN i processi legati alla trasformazione della sostanza organica sono implementati in modo che

TABELLA 1 - Caratteristiche dei suoli.

TABLE 1 - Main soils characteristics.

Località	Scheletro (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Carbonio organico (%)	C/N adim.	Class. USDA	Capacità di trattenuta (% peso)	Punto di appassimento (% peso)	Massa volumica apparente (t m <sup>-3</sup> )	Conducibilità alla saturazione (mm h <sup>-1</sup> )
Carmagnola, franco-sabbioso	assente	68,7	26,8	4,5	0,88	8	FS	22,8	5,2	1,35	9,0
Carmagnola franco	assente	52,3	31,7	16,0	0,51	8	F	20,0	7,5	1,39	6,0
Borgo S. Lorenzo	29,6	28,7	36,0	35,3	0,88	7	FA	35,8	12,1	1,20	0,2
Bonassai	7,6	38,9	24,8	36,3	2,8	10	FA	27,1	14,3	1,45	10,0

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

TABLE 2 - Notes of crop management (2 - years averaged values).

Località	Coltura	Semina	Fertilizzazioni azotate (kg ha <sup>-1</sup> anno <sup>-1</sup> )	Utilizzazioni	Irrigazione (mm anno <sup>-1</sup> )
Carmagnola terreno franco-sabbioso	mais	17.5.93 23.4.94	235	7.9.93 22.8.94	60
	erba medica	2.9.91	0	5 tagli anno <sup>-1</sup>	0
Carmagnola terreno franco Borgo S. Lorenzo	erba medica	2.9.91	0	5 tagli anno <sup>-1</sup>	0
	pascolo	12.9.91	170	pascolamento da	0
Bonassai	erba medica	10.9.91	0	4 tagli anno <sup>-1</sup>	0
		mais + loiessa	21.10.92 + 22.5.93 11.11.93 + 17.5.94	390	10.5.93 + 30.9.93 4.5.94 + 3.10.94
	erba medica	2.11.94 1.9.91		3.05.95 6 tagli anno <sup>-1</sup>	800

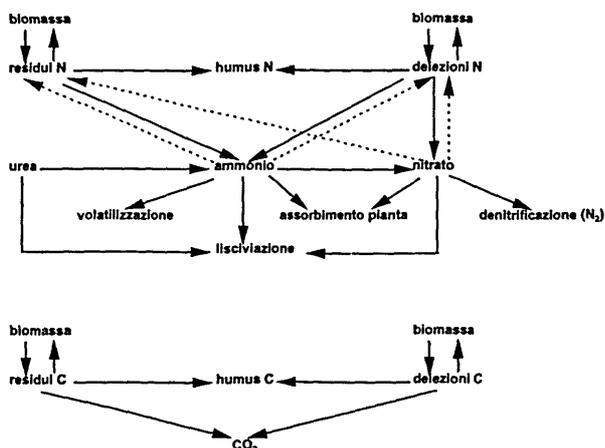


Fig. 1 - Rappresentazione schematica della dinamica del carbonio e dell'azoto implementata in LEACHN. (da Huston e Wagenet, ridisegnato).

Fig. 1 - Diagram of dynamics of carbon and nitrogen as implemented in LEACHN (from Huston and Wagenet, redraw).

sia il carbonio l'oggetto primo delle trasformazioni e l'azoto venga calcolato solo in conseguenza dei rapporti C/N dei vari pool organici.

La sostanza organica viene suddivisa in 3 «pool»: «manure», corrispondente alle deiezioni, «litter», corrispondente ai residui colturali e humus. Le prime due sono a degradazione relativamente rapida, mentre l'humus viene considerato più stabile, con rapporto C/N invariabile e prefissato dall'utilizzatore. La mineralizzazione dell'humus, che dà luogo alla produzione di ione ammonio, segue una cinetica di primo ordine:

$$\frac{dN_h}{dt} = -\mu_h N_h$$

dove:

$N_h$  rappresenta la concentrazione (mg kg<sup>-1</sup> di suolo) di humus;  
 $\mu_h$  è il tasso di reazione di primo ordine, aggiustato in funzione di temperatura e umidità del suolo.

Per la simulazione dell'evoluzione dei «pool» «manure» e «litter» si calcola un tasso di mineralizzazione  $k_i$  (qualora abbia segno negativo è prevista riorganizzazione) condizionato anche dai valori del rapporto C/N del «pool» stesso. Per la stima di tale rapporto si ipotizza che le trasformazioni tra i «pool» e la biomassa microbica (che ha un valore del rapporto C/N fisso,

pari a quello dell'humus e definito in input) sia un processo interno e che essa rimanga a costituire il «pool» di partenza. Il carbonio viene perso per respirazione con formazione di CO<sub>2</sub> in funzione di un fattore di efficienza f<sub>e</sub> (f<sub>e</sub> =  $\frac{\text{humusC} + \text{biomassaC}}{\text{humusC} + \text{biomassaC} + \text{CO}_2}$ ) e umificato in funzione di un coefficiente f<sub>h</sub> (f<sub>h</sub> =  $\frac{\text{humusC}}{\text{humusC} + \text{biomassaC}}$ ). Pertanto la frazione di C che ritorna al «pool» stesso è data da f<sub>e</sub>(1 - f<sub>h</sub>)k<sub>i</sub>. La richiesta di N per le trasformazioni è determinata dal rapporto C/N dell'humus e della biomassa microbica. Il rilascio o la riorganizzazione dello ione ammonio è data da:

$$N_{i \rightarrow N-NH_4} = \left[ \frac{N_i}{C_i} - \frac{f_e}{r_0} \right]$$

dove:

r<sub>0</sub> è il rapporto C/N dell'humus e della biomassa microbica;

f<sub>e</sub> fattore di efficienza;

N<sub>i</sub> e C<sub>i</sub> contenuto di N e C del pool i.

Qualora il rapporto N/C divenga minore di f<sub>e</sub>/r<sub>0</sub> si ha riorganizzazione, a sua volta condizionata dalla disponibilità di ammonio e di nitrato.

La nitrificazione dell'ammonio avviene in funzione di un tasso potenziale (μ<sub>nit</sub>), ed è ridotta progressivamente all'avvicinarsi al valore soglia r<sub>0</sub> del rapporto

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:

$$\frac{dN_{NH_4}}{dt} = -\mu_{nit} \left( N_{NH_4} - \frac{N_{NO_3}}{r_0} \right)$$

La denitrificazione segue la cinetica di Michaelis-Menten, con il tasso di denitrificazione potenziale aggiustato in funzione della temperatura e dell'umidità del suolo. I tassi, ad eccezione di quello di denitrificazione, vengono definiti per un valore ottimale di contenuto idrico del terreno, al di sopra o al di sotto del quale subiscono una riduzione. Il tasso di denitrificazione è invece proporzionale all'umidità del suolo.

La volatilizzazione dell'ammoniaca è calcolata solo nei primi dieci centimetri di suolo ed è proporzionale alla concentrazione dello ione ammonio e al contenuto idrico del terreno.

L'assorbimento di nitrati e ammoniaca da parte della pianta segue quanto proposto da Watts e Hanks (1978) per il mais. L'assorbimento di azoto avviene attraverso il flusso traspirativo, che è supposto avere una concentrazione di N proporzionale a quella della soluzione circolante. Per il calcolo degli asporti giornalieri viene richiesto innanzitutto un valore potenziale di asporto annuo. In base alla fase vegetativa della coltura viene calcolato un potenziale giornaliero di assorbimento (NPOT) a cui viene aggiunta la somma dei deficit verificatisi rispetto a tale potenziale nel precedente periodo. Superati i 7/10 del ciclo vegetativo, il possibile recupero del deficit è ridotto a 1/3.

L'assorbimento effettivo è determinato dalla quantità di N trasportata nella pianta dal flusso traspirativo,

TABELLA 3 - Parametri usati nella creazione dei file di input di LEACHN.

TABLE 3 - LEACHN parameters used in input files.

Parametri di input comuni a tutte le località			Fonte			
Coefficiente di dispersione (λ)	mm	200	Vancloster <i>et al.</i> (1995)			
Potenziale idrico radicale minimo	kPa	- 1500	Hutson e Wagenet (1992)			
Rapporto massimo ETM/ETP	adim.	1,1	Hutson e Wagenet (1992)			
Coefficienti di partizione per l'urea (k <sub>d</sub> )	l kg <sup>-1</sup>	1	Lotse <i>et al.</i> (1992)			
Coefficiente di partizione per l'ammonio (k <sub>d</sub> )	l kg <sup>-1</sup>	4	Lotse <i>et al.</i> (1992)			
Coefficiente a di Bresler	adim	0,0008	Hutson e Wagenet (1992)			
«Synthesis efficiency factor» (f <sub>s</sub> )	adim.	0,5	Johnsson (1987)			
«Humification factor» (f <sub>a</sub> )	adim.	0,2	Johnsson (1987)			
Q <sub>10</sub>	adim.	2,3	Ramos et Carbonel (1991)			
Contenuto d'aria alla saturazione idrica	% in vol.	0,08	Hutson e Wagenet (1992)			
Tasso di idrolisi dell'urea	d <sup>-1</sup>	0,43	Vancloster <i>et al.</i> (1995)			
Tasso di denitrificazione	d <sup>-1</sup>	0,001	Tillotson et Wagenet (1982)			
Tasso di mineralizzazione del «litter»	d <sup>-1</sup>	0,0015	Vancloster <i>et al.</i> (1995)			
Tasso di mineralizzazione del «manure»	d <sup>-1</sup>	0,04	Bergstrom et Jarvis (1991)			
Tasso di volatilizzazione	d <sup>-1</sup>	0,4	Lotse <i>et al.</i> (1992)			
Rapporto NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> massimo in soluzione	adim.	8	Johnsson (1977)			
Costante di semi-saturazione	mg l <sup>-1</sup>	10	Johnsson (1987)			
Coefficiente di diffusione molecolare in acqua	mm <sup>2</sup> d <sup>-1</sup>	120	Ramos et Carbonel (1991)			
Parametri specifici di ogni località (*)			Carmagnola FS	Carmagnola F	Borgo S. Lorenzo	Bonassai
Coefficiente a di Campbell	kPa	- 4,5	- 10	- 3	- 17,5	
Coefficiente b di Campbell	adim.	10	8	3	5	

(\*) Fonte: Acutis *et al.* (1997).

TABELLA 4 - Valori annuali di apporti e asporti di  $\text{NO}_3^-$ -N da parte delle colture e quantità di  $\text{NO}_3^-$ -N lisciviato con relative concentrazioni medie di  $\text{NO}_3^-$ -N delle acque di percolazione.

TABLE 4 - Yearly  $\text{NO}_3^-$ -N input and crops uptake.

Località	Coltura	Apporti* (kg ha <sup>-1</sup> )		Asporti (kg ha <sup>-1</sup> )		Lisciviato (kg ha <sup>-1</sup> )		Concentrazione (mg l <sup>-1</sup> )	
		1993	1994	1993	1994	1993	1994	1993	1994
Campagnola FS	mais	263	268	287	193	38,0	22,3	24,5	16,8
	erba medica	30	30	433	478	22,4	1,0	8,4	0,5
Carmagnola F	erba medica	30	30	381	355	19,3	11,2	10,3	5,4
Borgo S. Lorenzo	pascolo	188	188	243	167	26,4	10,7	10,5	6,7
	erba medica	19	19	334	289	19,7	11,0	8,8	6,3
Bonassai	mais + loiessa	421	401	297	323	62,6	18,7	46,0	16,9
	erba medica	21	21	567	402	2,4	7,6	2,0	6,1

\* Concimazioni + piogge + irrigazioni + eventuali deiezioni.

ma il livello massimo di assorbimento non può superare il valore della somma di NPOT e dei deficit.

La dinamica dell'assorbimento dell'N è facilmente adattabile ad altre colture annue, modificando le date relative alle principali fasi fenologiche e la profondità massima stimata dell'apparato radicale. LEACHN prevede inoltre la possibilità di simulare colture perenni con assorbimento potenziale dell'N costante.

In LEACHN non è prevista la simulazione di colture azotofissatrici. Per l'erba medica si è proceduto alla simulazione di un coltura perenne con apparato radicale profondo quanto quello accertato e con un assorbimento potenziale dell'azoto pari a quello di un prato avvicendato non fertilizzato. In tal modo si è cercato di escludere dal sistema l'azotofissazione, senza rinunciare al tentativo di simulare l'erba medica, che rappresenta una coltura molto importante nei sistemi foraggeri italiani.

### c) Tecniche di calibrazione e validazione

La calibrazione del modello è stata effettuata sui dati di lisciviazione cumulata di  $\text{NO}_3^-$ -N.

Si è scelta quale coltura di calibrazione la coltura foraggera non azotofissatrice. Su questa coltura si sono ottenuti per calibrazione i valori dei parametri in esame che consentivano di ottenere il valore minimo del «root mean square error - RMSE» (Loague e Green, 1991):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (O - P)^2}{n}}$$

con:

P = valore predetto dal modello;

O = valore misurato;

n = numero di coppie di valori.

Per la calibrazione non si è intervenuti sul comparto idrologico, già oggetto di un precedente lavoro (Acutis *et al.*, l.c.), adottando i valori delle costanti della curva

di ritenzione idrica già identificati nel lavoro citato. I parametri usati nel comparto azoto del modello LEACHN (vedi tabella 3) sono stati oggetto di un'analisi di sensibilità (Grignani *et al.*, 1996). Quelli che maggiormente influenzano il modello, a parità di input, sono risultati essere il tasso di mineralizzazione dell'humus (TMH) e quello di nitrificazione (TN), che sono stati quindi oggetto di calibrazione.

Si è proceduto con una tecnica automatizzata di ricerca a griglia, calcolando il valore di RMSE per ogni combinazione di parametri; i valori del tasso di mineralizzazione dell'humus sono stati fatti variare tra

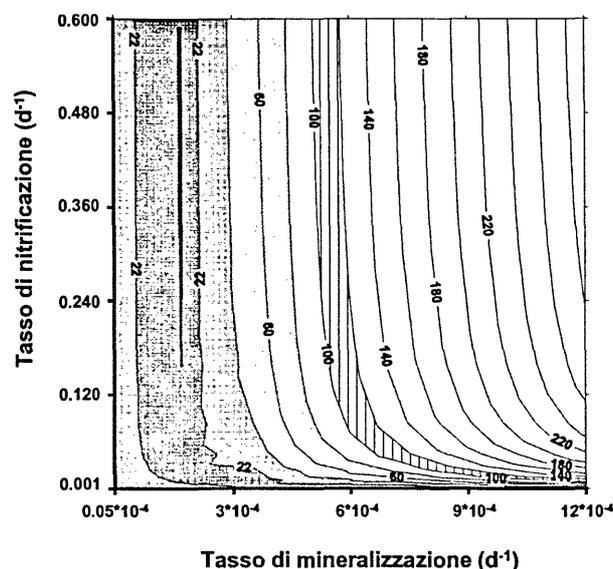


Fig. 2 - Esempio di una porzione di una mappa a curve di livello (Carmagnola FS, mais) dei valori dell'indice RMSE ottenuti al variare dei tassi di mineralizzazione dell'humus e di nitrificazione. L'area in nero rappresenta la zona di migliore risposta del modello con valori di RMSE di 12.

Fig. 2 - Part of RMSE countour map (Carmagnola, FS soil, maize) as function of humus mineralization rate and nitrification rate. Black area represent the best values. with RMSE equal to 12.

$5 \cdot 10^{-5}$  e  $0,003 \text{ d}^{-1}$  e quelli del tasso di nitrificazione tra  $0,001$  e  $0,6 \text{ d}^{-1}$ , con passo logaritmico per entrambi i parametri, per un totale di 225 esecuzioni di LEACHN per ogni terreno. Apposito software provvedeva a generare le simulazioni con i parametri di input appropriati e a selezionare la coppia che dava luogo al più basso valore di RMSE.

I valori estremi della griglia sono derivati da quelli reperiti in bibliografia e la scelta del passo logaritmico è dipesa dalla necessità di testare con maggior precisione il modello nell'intervallo di valori riscontrati con maggior frequenza in bibliografia.

I valori così ottenuti sono stati applicati all'erba medica per predire la lisciviazione, ottenendo così una validazione dei parametri trovati. A Carmagnola, per la non disponibilità dei dati relativi alla coltura del mais su terreno franco, a causa di un malfunzionamento del

lisimetro relativo, si è proceduto alla calibrazione del modello sulla coltura dell'erba medica.

## Risultati

### a) Dati misurati

In tabella 4 sono riportati apporti, asporti e perdite di N con le relative concentrazioni medie. Non sono considerati i dati relativi al lisimetro a pascolo di Bonassai, per l'assenza di percolazioni rilevanti (Acutis *et al.*, l.c.). In tutte le località si è osservato che l'erba medica e le colture prative hanno sempre presentato perdite per lisciviazione modeste. Per il mais si sono registrati comportamenti differenziati tra località e anni: a Carma-

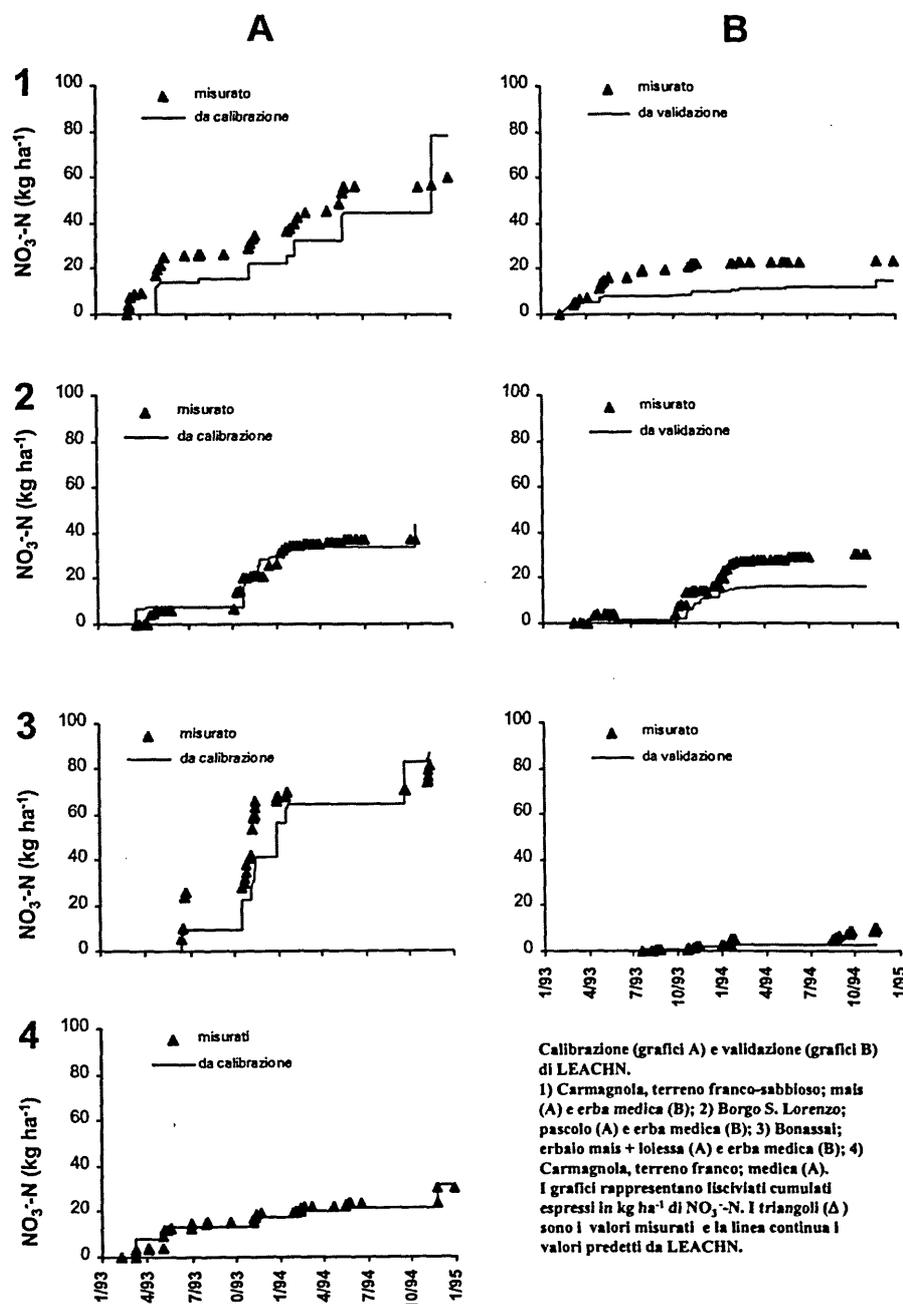


Fig. 3 - Valori cumulati di lisciviazione di  $\text{NO}_3\text{-N}$  previsti da LEACHN vs valori misurati.

Fig. 3 - Predicted cumulated values of  $\text{NO}_3\text{-N}$  vs measured.

TABELLA 5 - Valori dell'indice RMSE ottenuti sui valori di N lisciviato cumulato dopo calibrazione e in validazione.

TABLE 5 - RMSE values for cumulated losses by drainage of  $\text{NO}_3^-$ -N after calibration or validation.

Località	Cultura	RMSE	
Carmagnola FS	mais	11,5	Calibrazione
	erba medica	9,9	Validazione
Carmagnola F	erba medica	2,2	Calibrazione
Borgo S. Lorenzo	pascolo	3,6	Calibrazione
	erba medica	9,5	Validazione
Bonassai	mais + loiessa	14,0	Calibrazione
	erba medica	3,1	Validazione

gnola, con apporti di N tipici della zona, si sono rilevati valori di lisciviazione e di asportazione contenuti; a Bonassai, invece, in presenza di apporti più elevati di N (successione mais-loiessa) si sono registrate notevoli oscillazioni nelle perdite tra un anno e l'altro principalmente in relazione alla piovosità autunnale che ha dato luogo ad altezze di percolazione più contenute nel secondo anno.

#### b) Valutazione del modello

La grande sensibilità di LEACHN, in particolare al variare del TMH, hanno a posteriori avvalorato la scelta del passo logaritmico. La figura 2 evidenzia come la zona dei valori minimi di RMSE sia piccola, delimitata da una ridotta variazione del TMH e da una sostanziale indifferenza del valore di TN. Passi lineari avrebbero richiesto un numero elevatissimo di esecuzioni del modello per ottenere una precisione equivalente di verifica dei parametri, assai problematiche da realizzare, essendo necessari circa 3' per ogni esecuzione del modello su personal computer dotato di processore Pentium funzionante a 166 MHz.

In figura 3 sono riportati gli andamenti cumulati della lisciviazione osservata e stimata dal modello nelle diverse località, sia per le colture oggetto di calibrazione che per quelle utilizzate per la validazione. In generale si riscontra una discreta aderenza delle simulazioni ai dati misurati, con valori di RMSE mai superiori a  $14 \text{ kg ha}^{-1}$  di  $\text{NO}_3^-$ -N (tab. 5). È tuttavia evidente una riduzione della qualità delle simulazioni in fase di validazione, almeno in termini relativi, con una costante sottostima della lisciviazione per l'erba medica, che, vi-

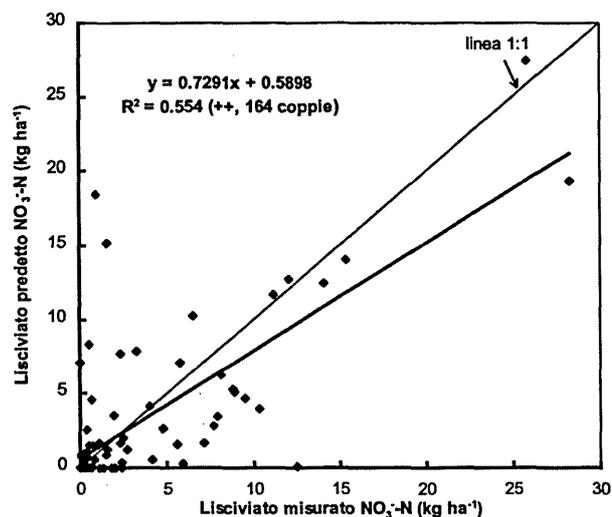


Fig. 4 - Relazioni tra il lisciviato totale mensile misurato e predetto.

Fig. 4 - Relationship between measured monthly values of  $\text{NO}_3^-$ -N drainage vs. predicted.

ste le approssimazioni adottate per la sua dinamica dell'azoto, richiederebbe una calibrazione separata. In tabella 6 vengono presentati i valori dei parametri ottenuti per calibrazione. I valori dei coefficienti TMH ottenuti per calibrazione risultano molto simili a Borgo S. Lorenzo, a Bonassai e per il terreno franco di Carmagnola, in relazione alla maggior presenza di argilla, mentre per il terreno franco-sabbioso di Carmagnola la mineralizzazione dell'humus risulta tre volte superiore; in ogni caso i coefficienti TMH si situano in corrispondenza dei valori più bassi reperibili in bibliografia. Per quanto riguarda TN si registrano variazioni di 2 ordini di grandezza, con maggior tasso di nitrificazione a Carmagnola, ma queste variazioni condizionano meno le simulazioni di quanto non facciano quelle relative a TMH.

Considerando i singoli eventi di lisciviazione, si è dapprima verificata la qualità della previsione della percolazione. La regressione percolato predetto vs. misurato è risultata comune a tutte le località e colture, con  $R^2$  di 0,50 e coefficiente angolare di 0,44. La sezione idrologica del modello, che nel complesso simula molto bene l'andamento della percolazione (Acutis *et al.*, l.c.), non appare tuttavia in grado di prevedere con sufficiente precisione il verificarsi di eventi di percolazione in un momento specifico e anche pochi giorni di differenza nella previsione del percolato possono comportare apprezzabili differenze tra dati misurati e simulati.

TABELLA 6 - Valori dei parametri che ottimizzano la previsione della lisciviazione di  $\text{NO}_3^-$ -N.

TABLE 6 - Parameters values optimizing prediction of drainage of  $\text{NO}_3^-$ -N.

Parametri ottenuti per calibrazione		Carmagnola FS	Carmagnola F	Borgo S. Lorenzo	Bonassai
Tasso di nitrificazione	$\text{d}^{-1}$	0,3	0,2	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Tasso di mineralizzazione dell'humus	$\text{d}^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-5}$	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$0,5 \cdot 10^{-5}$

La previsione delle concentrazioni di  $\text{NO}_3^-$ -N nei singoli eventi è parsa nel complesso insoddisfacente: la regressione tra concentrazioni previste e misurate, per quanto significativa ( $P < 0,001$ ), ha presentato valori di 0,27 per l' $R^2$  e di 0,56 per il coefficiente angolare.

Dalla difficoltà di prevedere per i singoli eventi sia le altezze di percolazione che le concentrazioni di nitrati ne è derivata una modestissima capacità previsionale delle perdite di N per singolo evento: la regressione tra perdite previste e misurate ha fatto registrare un  $R^2$  di 0,05 e coefficiente angolare di 0,13 ( $P < 0,001$ ).

Alla luce delle difficoltà sopra esposte, che paiono eccessivamente penalizzanti per la valutazione del modello, concordemente a Jemison *et al.* (l.c.) si sono valutate le predizioni a livello di totali mensili, considerando che per stime di impatto ambientale e di efficienza di sistemi agricoli, questa base temporale appare essere del tutto sufficiente. Sull'insieme dei dati provenienti da tutte le località, si è riscontrato un netto miglioramento delle capacità previsionali del modello (fig. 4), che sebbene presenti ancora una siste-

matica tendenza alla sottostima, ha colto bene la dimensionalità degli eventi.

In figura 5 sono confrontati i valori di lisciviato mensile previsti e misurati per ogni località e coltura. Si rileva che mentre la maggior parte dei dati viene prevista con errore accettabile, in qualche situazione (Bonassai doppio ciclo di erbai, Borgo S. Lorenzo pascolo e Carmagnola FS mais) la presenza di alcune stime errate riduce la qualità della simulazione. Per la coltura dell'erba medica, e nonostante le approssimazioni adottate, le previsioni del modello sono risultate di notevole precisione. Alcuni indici di qualità della simulazione suddivisi per località e coltura sono riportati in tabella 7. Le differenze medie tra i percolati simulati e misurati sono in genere ridotte e mai significative ( $P > 0,2$ ), i valori di RMSE risultano con una sola eccezione, inferiori a  $4 \text{ kg ha}^{-1}$  e inferiori a quelli relativi alla previsione del lisciviato cumulato (cfr. tabella 5). I valori di RMSE espresso come percentuale del valore medio (RRMSE) sono elevati, dell'ordine del 100%, e simili o leggermente inferiori a quelli riportati da Jamison *et*

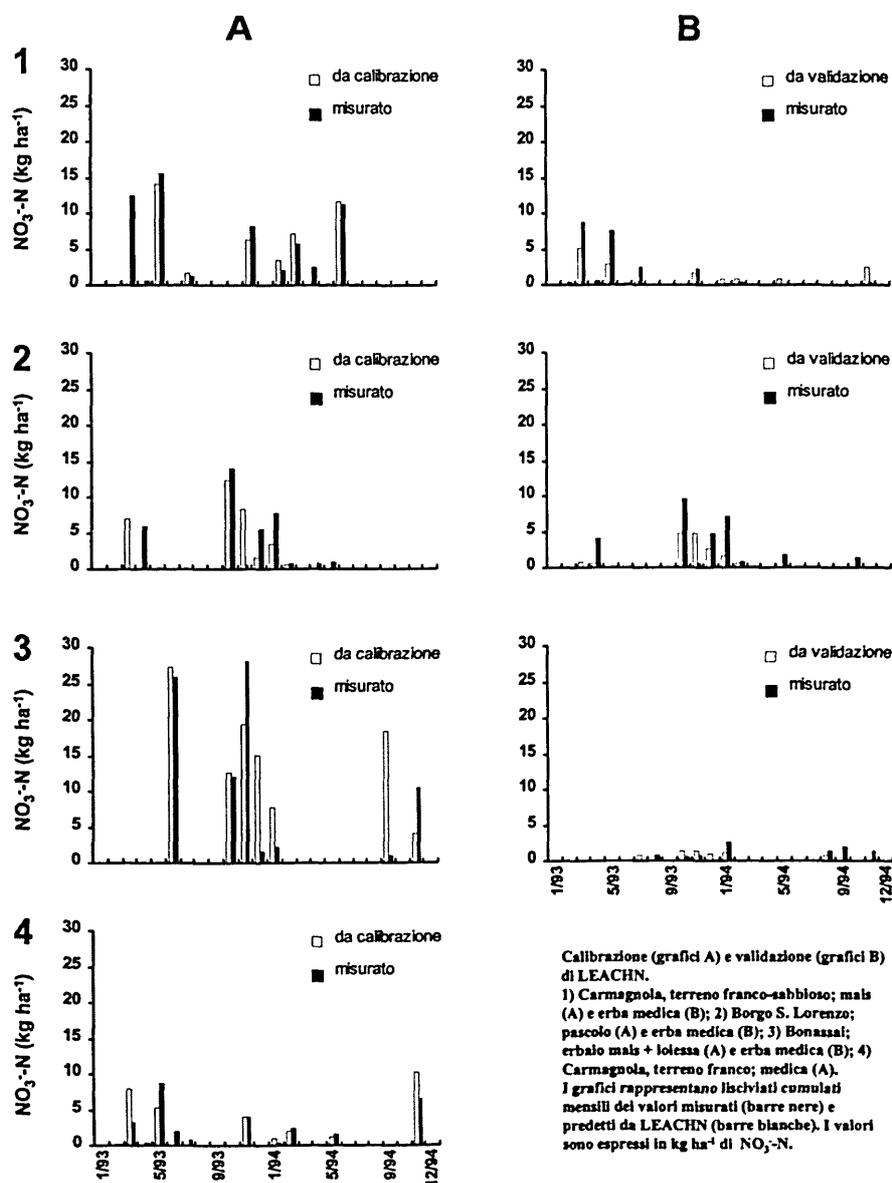


Fig. 5 - Comparazione tra il lisciviato mensile predetto e misurato per le varie località e colture.

Fig. 5 - Comparison between measured monthly values of  $\text{NO}_3^-$ -N and predicted for each site and crop.

TABELLA 7 - Indici statistici relativi alla predizione dei valori di lisciviato cumulato mensile.

TABLE 7 - Statistical index for the prediction of monthly cumulated losses by drainage.

Località	Coltura	Differenze medie <sup>*</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )	RMSE (kg ha <sup>-1</sup> )	RRMSE <sup>§</sup> (%)	R <sup>2</sup>	Pendenza **	Intercetta ***
Carmagnola FS	mais	1,0(0,54) *	3,4	85	0,61	0,69(0,07)	0,18(0,86)
	erba medica	0,5(0,49)	1,7	118	0,73	0,45(< 0,01)	0,27(0,25)
Carmagnola F	erba medica	- 0,1(0,93)	1,8	95	0,66	1,01(0,97)	0,08(0,90)
Borgo S. Lorenzo	pascolo	0,2(0,89)	3,6	136	0,35	0,55(0,08)	1,06(0,39)
	erba medica	1,1(0,27)	2,6	117	0,36	0,32(< 0,01)	0,47(0,38)
Bonassai	mais + loiessa	- 3,3(0,54)	9,5	82	0,30	0,37(0,06)	10,60(0,05)
	erba medica	0,3(0,36)	1,2	103	0,03	- 0,13(< 0,01)	0,92(0,04)

\* Livello di significatività del test t relativo alla differenza tra le medie dei dati misurati e simulati.

\*\* Livello di significatività per il test pendenza  $\neq 1$ .

\*\*\* Livello di significatività per il test intercetta  $\neq 0$ .

<sup>†</sup>  $\Sigma$  (misurati-simulati)/n. coppie.

<sup>§</sup> RMSE \* 100/valore medio.

al. (l.c.); le pendenze delle regressioni calcolate entro ogni località sono però sempre inferiori a 1 (salvo in un caso) e le intercette non risultano diverse da 0. Solo a Bonassai si riscontra un'intercetta che assieme al valore di R<sup>2</sup> e del coefficiente angolare, ha indicato una simulazione del tutto inadeguata.

## Conclusioni

Il modello LEACHN è in grado di fornire predizioni di buona qualità in situazioni molto diversificate, e quindi di essere utilizzato validamente in studi di tipo territoriale. Il modello è però idoneo alla predizione dell'andamento della lisciviazione nel tempo e non alla predizione dei singoli eventi. Per ottenere predizioni interessanti pare necessaria almeno una calibrazione per le principali tipologie di suolo, non essendo reperibili in bibliografia criteri specifici per la scelta dei diversi coefficienti da adottarsi, in particolare per i tassi di mineralizzazione dell'humus e di nitrificazione. Per quanto il modello manchi completamente di una procedura idonea a simulare l'assorbimento dell'azoto in colture azotofissatrici, la procedura adottata per la simulazione dell'erba medica appare idonea a cogliere l'ordine di grandezza delle perdite da questa coltura, consentendo al modello capacità di valutazioni di sistemi colturali complessi. Possibili miglioramenti del modello potrebbero essere orientati alla simulazione dell'interazione tra sviluppo della pianta e disponibilità di acqua e N nel suolo e al perfezionamento della simulazione della volatilizzazione. Per la predizione di perdite di nitrati su scala territoriale la già complessa implementazione della dinamica dell'azoto appare appena sufficiente per adattarsi alle diverse situazioni pedo-climatiche e colturali; modelli con implementazioni più semplificate potrebbero portare a conclusioni alquanto approssimate.

Ricevuto il 12.11.1996

## Bibliografia

- ACUTIS, M., ARGENTI, G., CAREDDA, S., CAVALLERO, A., DUCCO, G., FARA, G., GRIGNANI, C., PARDINI, A., PORQUEDDU, C., REYNERI, A., SULAS, L., TALAMUCCI, P., ZANCHI, C., 1997. Modellizzazione della percolazione profonda dell'acqua nel terreno: calibrazione e validazione dei codici CREAMS e LEACHW in diversi suoli e colture foraggere. Riv. di Agron., 31 (1), 33-41.
- BERGSTRÖM, L., JARVIS, N.J., 1991. Prediction of nitrate leaching losses from arable land under different fertilization intensities using the SOIL-SOILN models. Soil Use and Management, 7, n. 2, 79-87.
- FRANCANI, V., DENTI, E., SALA, P., ALBERTI, L., 1996. Protezione e recupero delle acque sotterranee e dei terreni inquinati. Convegno Geofluid. Piacenza, 3 ottobre 1996.
- GIUPPONI, C., 1995. Modelling agriculture and the environment: crop production and diffuse pollution. In Giupponi, C., Marani, A., Morari, F. (eds.): Modelling the fate of agrochemicals and fertilizers in the environment. ESA, 5-25.
- GRIGNANI, C., ACUTIS, M., 1996. Analisi di sensibilità del modello LEACHN. Da definire.
- 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., 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 Science, Research Series No. 92-3, New York, Cornell University.
- KNISEL, W.G., 1980. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management system. USDA, Conservation Research Report No. 26.
- JEMISON, J.M., JABRO, J.D., FOX, R.H., 1994. Evaluation of LEACHM: II. Simulation of nitrate leaching from nitrogen-fertilized and manured corn. Agron. J., 86, 852-859.
- JOHNSSON, H., BERGSTRÖM, L., JANSSON, P.E., PAUSTIAN, K., 1987. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. Agriculture, Ecosystems and Environment, 18, 333-356.
- 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.
- LOTSE, E.G., JABRO, J.D., SIMMONS, K.E., BAKER, D.E., 1992.

- Simulation of nitrogen dynamics and leaching from arable soils.* Journal of Contaminant Hydrology, 10, 183-196.
- RAMOS, C., CARBONELL, E.A., 1991. *Nitrate leaching and soil moisture prediction with the LEACHM model.* Fertilizer Research, 27, 171-180.
- SIERRA, J., 1992. *Relationship between mineral content and N mineralization rate in disturbed and undisturbed soil samples incubated under field and laboratory conditions.* Aust. J. Soil Res., 30, 477-492.
- STANFORD, G., SMITH, S.J., 1978. *Estimating potentially mineralizable soil nitrogen from a chemical index of soil nitrogen availability.* Soil Science, 1978 (122), 71-76.
- STARR, J.L., PARLANGE, J.-K., NIELSEN, D.R., 1979. *The use of open soil systems and mathematical models to study N reactions and movement in soils.* In Gasser, J.K. (ed.): *Modelling Nitrogen from Farm Wastes*, 194 p. ASP London.
- STOCKLE, C.O., NELSON, R., 1994. *CROPSYST. Cropping System Simulation Model. User Manual.* Washington State University, 145 p.
- TILLOTSON, W.R., WAGENET, R.J., 1982. *Simulation of fertilizer nitrogen under cropped situations.* Soil Science, 133, n. 3, 133-143.
- VACHAUD, G., VAUCLIN, M., ADDISCOTT, T.M., 1993. *Solute transport in the Vadose Zone: a review of models.* In Avogadro A. and Ragaini, R.C. (eds.): *Technologies for Environment Cleanup: Soil and Groundwater*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- VANCLOSTER, M., VIAENE, P., DIELS, J., FEYEN, J., 1995. *A deterministic evaluation analysis applied to an integrated soil-crop model.* Ecological Modelling, 81, 183-195.
- WATT, D.G., HANKS, R.J., 1978. *A soil-water-nitrogen model for irrigated corn.* Soil Sci. Soc. Am. J., 42, 492-499.