

SIMULAZIONE DEL DEFLUSSO LATERALE SATURO, DEI LIVELLI DI FALDA E DELL' UMIDITÀ DEL SUOLO ALLA SCALA DI VERSANTE

Modelling subsurface flow, water table and soil moisture at hillslope scale

M. Pirastru¹, M. Iovino², R. Marrosu¹, M. Niedda¹

Sommario

La corretta rappresentazione dei processi idrologici alla scala di versante è fondamentale per la simulazione della risposta idrologica dei bacini idrografici durante eventi di pioggia intensa. I modelli basati sulla risoluzione dell'equazione di Richards possono simulare efficacemente le dinamiche della zona satura e non satura del suolo. Tuttavia essi richiedono una parametrizzazione onerosa, difficile da rilevare sperimentalmente soprattutto su ampie scale spaziali di applicazione. In questo lavoro di ricerca è stato sviluppato un modello idrologico monodimensionale di versante, in cui i processi di flusso laterale di falda sono rappresentati attraverso l'equazione di Darcy, mentre sono trascurati i processi dinamici nella zona non satura del suolo. L'effetto della ritenzione idrica capillare nella zona non satura è incorporato nel modello attraverso il termine della porosità drenabile del suolo che varia non linearmente in funzione della profondità della falda. A riguardo, l'assunto principale per la determinazione della porosità drenabile è che l'umidità nella zona non satura del suolo raggiunga istantaneamente la condizione di equilibrio idrostatico rispetto alla linea di falda. Il modello è stato applicato per la simulazione dell'andamento temporale del deflusso sottosuperficiale, dell'umidità del suolo e dei livelli di falda osservati in un ripido versante nel bacino idrografico del Lago di Baratz, in Sardegna. I parametri del modello, relativi alla trasmissività idraulica laterale e alle proprietà di ritenzione idrica del suolo, sono stati ricavati a partire dai dati idrologici raccolti. La calibrazione del modello è stata quindi limitata alle sole perdite idriche dovute a flussi laterali uscenti dal versante, di difficile quantificazione sperimentale.

Le performance predittive del modello sono risultate soddisfacenti, come confermato da coefficienti di efficienza di Nash-Sutcliffe prossimi a 0.8 per tutte le variabili idrologiche simulate. L'umidità del suolo, i livelli di falda e il deflusso sottosuperficiale sono stati ben riprodotti in termini di tempistica della risposta idrologica durante i periodi piovosi e di velocità di esaurimento nei periodi asciutti. Il modello sviluppato può essere effettivamente utilizzato per predire la risposta idrologica nei versanti naturali.

¹ Dipartimento di Agraria, Sezione di Ingegneria del Territorio, Università di Sassari, Italia, e-mail: mpirastru@uniss.it ; rmarrosu@uniss.it; niedda@uniss.it

² Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali, Università degli Studi di Palermo, e-mail: massimo.iovino@unipa.it.

Summary

The correct representation of the hydrological processes at the hillslope scale is fundamental to simulate the hydrological response during intense rainfall in catchments. Models which solve the Richards equation are formidable tools to reproduce groundwater dynamics. However, they require parameters that are difficult to obtain at large scale of model application. We developed a hydrological model applicable at hillslope scale in which lateral saturated flow is modelled by the Darcy law and water dynamic in the vadoze zone is neglected. Water retention effects of the capillary fringe are taken into account computing the drainable porosity of the soil as non-linear function of the water table depth. The drainable porosity is computed assuming hydrostatic soil moisture distribution in the unsaturated zone. The model was applied to simulate soil moisture, water table depth and subsurface flow collected at a hillslope in the Baratz Lake catchment, Sardinia. Lateral soil hydraulic transmissivity and water retention characteristic were obtained from the observed data and the model calibration was limited only to one parameter related to the lateral soil leakage. The model satisfactorily simulated the observed data. The Nash-Sutcliffe efficiency was close to 0.8 for all the simulated times series. Soil moisture, water table levels and subsurface flow were well reproduced in terms of timing and decaying of the response. Hence, the developed model can be a valuable tool for predicting the hydrological response in natural hillslopes.

1. Introduzione

Il deflusso laterale sottosuperficiale della falda ipodermica nei versanti è un processo fondamentale che governa la risposta idrologica alle precipitazioni in molti bacini idrografici delle regioni con clima umido temperato (Weiler et al. 2005), nonché in molte regioni semiaride (Newman et al., 1998; Niedda et al., 2014). I modelli idrologici di simulazione dei deflussi rappresentano al giorno d'oggi lo strumento di indagine più avanzato per comprendere e riprodurre i deflussi idrici osservati in queste regioni. Tradizionalmente i processi di trasporto dell'acqua nei versanti sono stati rappresentati per mezzo dell'equazione di Richards. Ad esempio Camporese et al., (2014) hanno usato la forma tridimensionale dell'equazione per studiare la relazione non lineare osservata tra alcune variabili idrologiche del suolo e il deflusso superficiale di un bacino sperimentale. Dusek et al. (2012) hanno simulato i deflussi di falda drenati in un versante con un modello che riproduceva separatamente il processo di infiltrazione verticale con l'equazione di Richards, e il flusso laterale dell'acqua sopra un substrato poco permeabile, attraverso l'equazione monodimensionale di Boussinesq. I modelli basati sull'equazione di Richards richiedono notevoli risorse computazionali e necessitano di una parametrizzazione onerosa, spesso individuabile per sola calibrazione. Si rende pertanto necessaria l'individuazione di ulteriori approcci modellistici di facile applicazione, facilmente parametrizzabili anche quando il dominio spaziale di simulazione si estende per centinaia o migliaia di metri quadrati, come avviene per esempio nel caso dei versanti.

La memoria presenta i risultati dell'applicazione di un nuovo modello di si-

mulazione dei deflussi laterali saturi, dei livelli di falda e dell'umidità del suolo dei versanti. Nel modello, i deflussi laterali di falda sono governati dalla legge di Darcy. Lo stato idrico della fase non satura del suolo è determinato dalla condizione di equilibrio idrostatico, in funzione dei livelli variabili della falda, secondo l'approccio illustrato da Bierkens (1998). Il modello è validato sui dati idrologici osservati in continuo in un ripido versante della Sardegna nord occidentale. L'obiettivo è di valutare, attraverso la simulazione di molteplici variabili idrologiche del suolo, la capacità del modello di riprodurre in modo adeguato la generazione dei deflussi idrici sottosuperficiale nel versante.

2. Descrizione del sito sperimentale e della strumentazione

Il caso di studio riguarda il bacino sperimentale del Lago di Baratz, che si trova nella Sardegna nord-occidentale (Niedda et al., 2014).

Il sito sperimentale è ubicato su un versante prospiciente la valle principale del bacino. Il versante è orientato a nord, ha un valore di quota media pari a 57 m s.l.m., ed è caratterizzato da una morfologia pressoché planare e un'inclinazione media del 30%. Una porzione di pendio che accoglie una fascia tagliafuoco, larga circa 15 m (Fig. 1), è stata scelta per la realizzazione dell'impianto sperimentale di misura dei deflussi sottosuperficiali. Il substrato geologico è costituito da arenarie alterate poco permeabili del Permiano sopra le quali si sviluppa un suolo con tessitura franco-sabbiosa e avente spessore variabile fra i 30 e 40 cm.

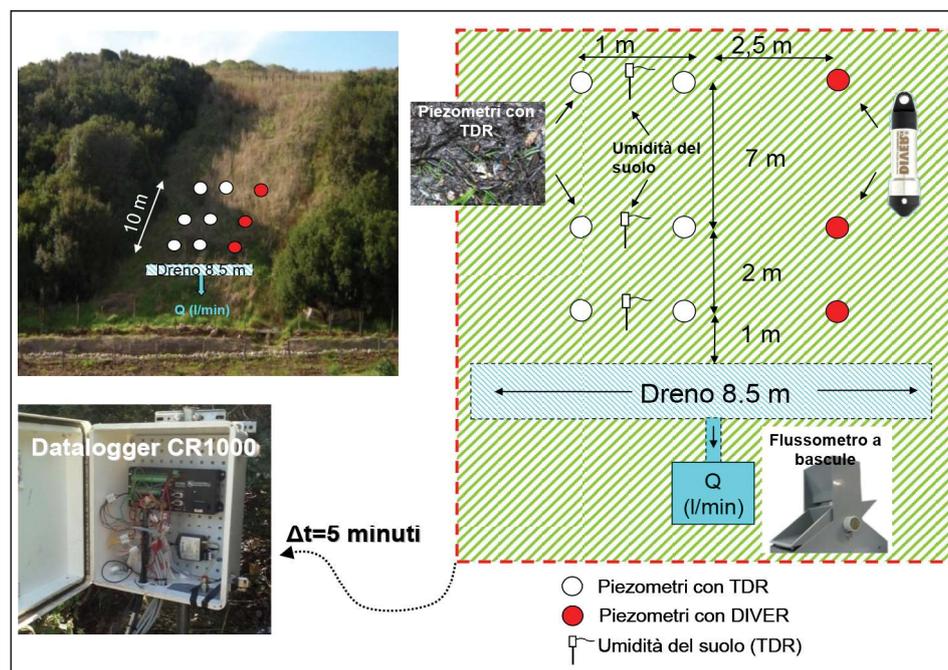


Fig. 1 - Sito sperimentale e planimetria della disposizione della sensoristica

Il sito sperimentale è stato strumentato per il rilievo in continuo delle portate di deflusso sottosuperficiale laterale saturo, delle altezze di falda e dell'umidità del suolo del versante. Una trincea drenante di lunghezza pari a 8.5 m è stata realizzata al di sopra dello strato impermeabile, 15 m a monte del piede del pendio (Fig. 1). Essa intercetta le portate in uscita dal suolo che sono state misurate per mezzo di un flussometro a vaschette basculanti, con capienza di 0.5 l ciascuna.

Le variazioni del livello di falda sono state monitorate in una rete di nove piezometri collocati a diversa quota lungo il pendio e disposti secondo lo schema illustrato in figura 1. La loro installazione è avvenuta trivellando il suolo sino a raggiungere la profondità del substrato poco permeabile. I livelli idrici in sei piezometri sono stati misurati mediante sonde TDR (modello CS616 della Campbell Sci., lunghezza delle guide d'onda di 30 cm) inserite verticalmente nei piezometri, mentre nei restanti pozzi la misura è stata affidata a trasduttori di pressione. Al fine di utilizzare le sonde TDR per il rilievo idrometrico, è stata preliminarmente condotta una calibrazione di laboratorio in cui il segnale delle sonde è stato correlato al grado di sommersione delle guide d'onda. In seguito l'affidabilità della calibrazione è stata positivamente validata per confronto con misure idrometriche manuali raccolte durante visite periodiche in campo. Infine, 3 sonde TDR sono state installate verticalmente nel suolo per monitorare le variazioni dell'umidità media dei primi 30 cm del suolo. Le sonde sono state sistemate a tre quote lungo il versante, in prossimità dei piezometri. Un datalogger CR1000 ha registrato tutte le misure automatiche ad intervalli di 5 minuti. Le precipitazioni, la radiazione netta, la temperatura e l'umidità dell'aria, la pressione barometrica sono state registrate allo stesso passo temporale da una stazione meteorologica sita nei pressi dell'area sperimentale.

3. Il modello di simulazione: applicazione e parametrizzazione

Il deflusso e i livelli della falda osservati nel versante sono stati simulati tramite un modello numerico 1D orizzontale. Per una esaustiva descrizione delle equazioni e dello schema risolutivo modello adottato nel modello si rimanda a quanto riportato in un precedente lavoro (Pirastru et al. 2016). Questa memoria, che richiama solo alcuni concetti fondamentali del modello, si focalizza principalmente sull'approccio seguito per l'individuazione dei parametri del modello.

Il modello si basa sull'assunto semplificativo che le precipitazioni, l'evapotraspirazione e i flussi idrici laterali nel suolo determinano un'istantanea variazione del livello della superficie piezometrica e, contemporaneamente, una variazione del contenuto idrico nel suolo non saturo. Pertanto tutta la precipitazione si infiltra, condizione questa da ritenersi accettabile in versanti caratterizzati da copertura vegetale naturale erbacea e suolo indisturbato come quello oggetto d'indagine. Il principio che governa la redistribuzione dell'acqua infiltrata fra la zona satura e insatura nel suolo è il raggiungimento istantaneo del profilo di equilibrio idrostatico delle tensioni matriciali sopra la falda. Lo stesso principio si applica allorquando un flusso netto laterale nella zona satura del suolo determina una variazione del livello di falda. Hilberts et al. (2005) hanno illustrato le formula-

zioni per il calcolo della variazione d'umidità del suolo insaturo nell'ipotesi che un profilo idrostatico delle tensioni sia presente sopra la falda. In queste formulazioni, l'umidità del suolo è espressa in funzione della profondità variabile della superficie freatica e dalle caratteristiche di ritenzione idrica del suolo. L'introduzione di questa semplificazione consente di tenere implicitamente conto delle interazioni tra la fase satura e non satura del suolo, senza introdurre formulazioni idrodinamiche *ad hoc* (per esempio basate sulla risoluzione dell'equazione verticale di Richards) per riprodurre le dinamiche di scambio idrico tra la zona vadosa e la falda.

Il dominio spaziale di simulazione è rappresentato dalla sezione mediana del versante, che si estende per una lunghezza di 52 m a partire dal limite superiore del versante e fino alla linea di drenaggio. La lunghezza del versante è discretizzata in segmenti aventi dimensione Δs di 0.25 m. Lo spessore del suolo, D , è assunto costante in tutto il versante e pari a 0.40 m. Le condizioni al contorno del dominio spaziale di simulazione sono rappresentate superiormente da una condizione di flusso nullo, e inferiormente da una condizione di carico imposto $h_b = 0$ al dreno. La condizione iniziale è stata ottenuta ipotizzando l'assenza di falda all'interno di tutto il versante. Il flusso laterale di falda drenato è ricavato come residuale del bilancio idrico di massa come illustrato in Hilberts et al. (2005).

L'applicazione del modello ha richiesto la conoscenza della curva di ritenzione idrica del suolo e del profilo verticale della conducibilità idraulica laterale di saturazione. Le proprietà di ritenzione idrica del suolo, $\theta(h)$, sono state stimate utilizzando le serie temporali di altezze di falda e di umidità del suolo monitorate alle varie altezze nel versante. Come si può osservare in figura 2, la relazione empirica tra le profondità di falda e l'umidità del suolo suggerisce una forte influenza della falda sul contenuto di umidità nella zona non satura, quale effetto della risalita capillare. La relazione falda-umidità osservata è stata efficientemente interpolata attraverso una funzione matematica che esprime la relazione tra volume idrico complessivamente immagazzinato nel suolo, o "storage" S , e profondità di falda, nell'ipotesi di sussistenza del profilo idrostatico delle tensioni sopra la falda. L'equazione è la seguente:

$$S(h)/D = \theta_s \cdot \left\{ h + \left(\frac{D-h}{\cos \phi} \right) \left[1 + \left| \alpha \left(\frac{h-D}{\cos \phi} \right) \right|^n \right]^{-\frac{1}{n}} \right\} \quad (1)$$

in cui θ_s , α ed n sono i parametri del modello Van Genuchten modificato da Hilberts et al (2005), h è lo spessore della falda e ϕ è l'angolo della pendice. Per ciascuno dei tre dataset disponibili delle coppie umidità del suolo-profondità di falda è stato individuato un set specifico parametri attraverso una procedura di ottimizzazione. Infine i valori di θ_s , α ed n utilizzati nel modello sono ricavati come media aritmetica dei tre set di parametri precedentemente ottenuti.

L'approccio metodologico considerato per la determinazione della conducibilità laterale satura a scala di versante è basato sul lavoro di Pirastru et al. (2017). In esso l'equazione di Darcy è stata esplicitata per ottenere la conducibilità idrau-

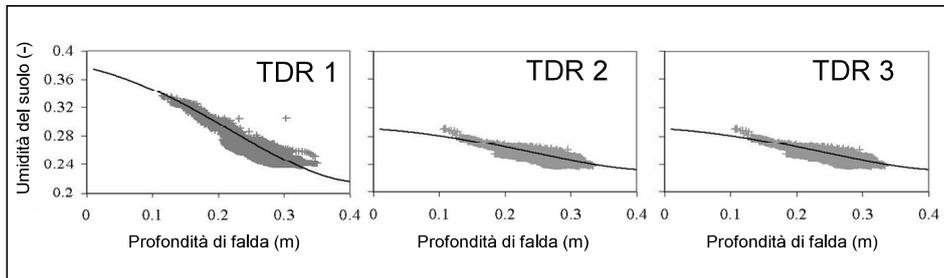


Fig. 2 - Equazione (1) fittata alle coppie sperimentali di umidità del suolo e profondità di falda per la stima dei parametri di ritenzione idrica (valori medi dei parametri: $\theta = 0.32$; $\theta = 0.$; $\alpha = 0.0002027 \text{ cm}^{-1}$; $n = 0.41$)

lica laterale, $K_{S,lat}$ in funzione della portata filtrata per unità di larghezza di dreno, q , dello spessore della falda, T , e del gradiente idraulico totale. Nel nostro lavoro, i termini q , T ed il gradiente sono stati rilevati direttamente durante il monitoraggio in campo. I dati stimati di $K_{S,lat}$ laterale sono stati interpolati attraverso una funzione esponenziale, come illustrato in figura. 3, i cui coefficienti sono stati introdotti nel modello.

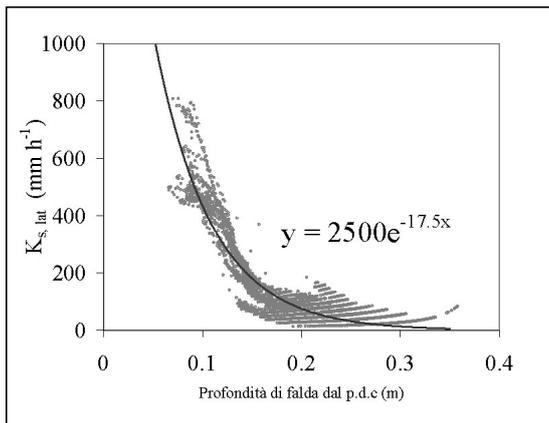


Fig. 3 - Valori di conducibilità idraulica laterale saturata del suolo saturo in funzione della profondità di falda dal piano di campagna e relativa funzione esponenziale interpolante

L'applicazione del modello ha richiesto la valutazione delle perdite idriche laterali al pendio, verso le porzioni ricoperte da macchia mediterranea (Fig. 1) contigue alla zona di versante analizzata. Infatti, come evidenziato in Pirastru et. al., (2017), il suolo sotto la macchia si presenta di frequente notevolmente più asciutto, soprattutto per effetto della elevata intercettazione fogliare. Le perdite idriche sono state determinate per calibrazione sulla base delle serie temporali di portate drenate osservate. In particolare è stato introdotto un unico parametro di calibrazione relativo alla perdita potenziale massima che si verifica quando il suolo è completamente saturo. Si è inoltre ipotizzata una riduzione delle perdite laterali al decrescere dello spessore saturo di suolo, con un andamento analogo a quello già evidenziato per la conducibilità idraulica di saturazione come illustrato in figura 3.

4. Risultati

Le simulazioni effettuate riguardano il periodo piovoso compreso tra gennaio e aprile 2016. In questo periodo circa il 60% della precipitazione è stato convertito in deflusso sottosuperficiale. Le portate osservate sono variate da un valore nullo sino a un massimo di circa 12 l/min (Fig. 4a). Il livello di falda è risultato variabile tra una profondità massima di 0.4 m, all'incirca corrispondente al livello del piano impermeabile, e una minima di circa 0.05 m dal piano campagna (Fig. 4b, 4c, 4d). L'umidità media nei primi 30 cm di suolo è oscillata da un minimo del 22% ad un massimo del 32% (Fig. 4e). Come mostra la figura 4, il modello ha efficientemente simulato tutte le variabili idrologiche osservate. Le portate idriche sono state ben riprodotte, in particolare durante le fasi di recessione. Relativamente ai

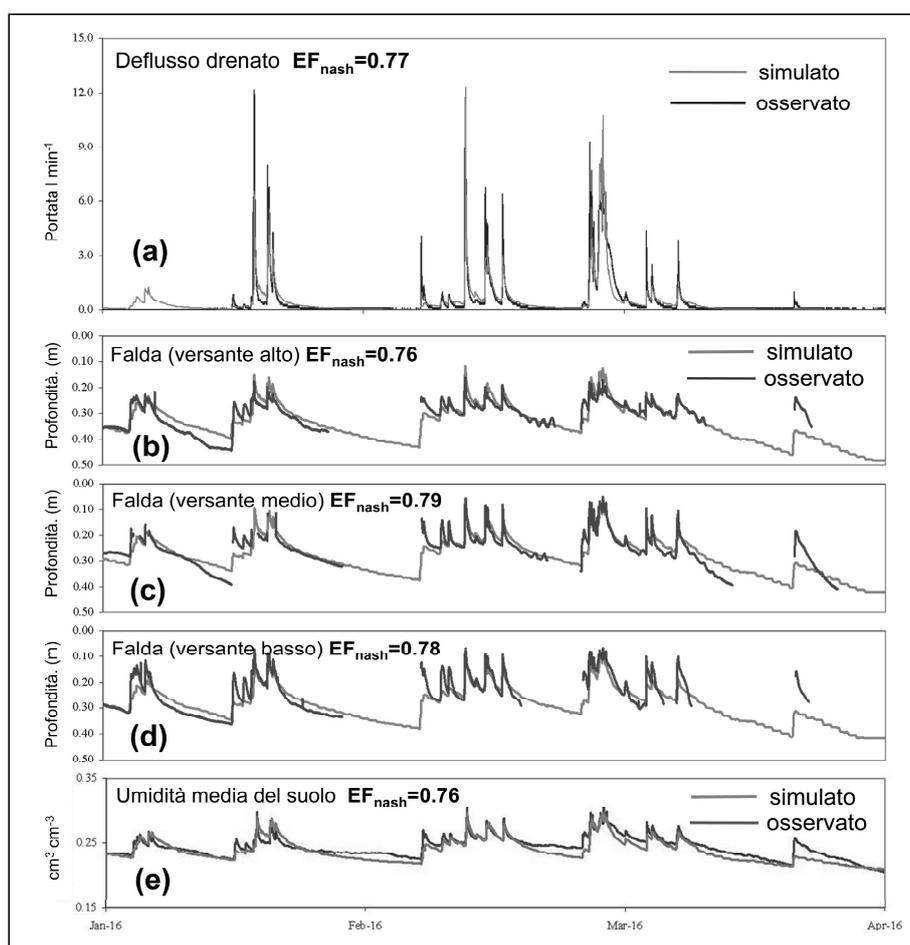


Fig. 4 - Confronto tra dati osservati e simulati di a) deflusso idrico sottosuperficiale drenato; b)-c)-d) profondità della falda dal piano di campagna alle varie quote nel versante; e) umidità media del suolo nel versante

picchi delle portate, il modello ha mostrato una tendenza alla sovrastima del dato osservato in occasione di eventi intensi (12 e 29 febbraio 2016), e di sottostima della risposta idrologica durante eventi di bassa e media intensità. Il coefficiente di efficienza di Nash e Sutcliffe (EF) relativo alla simulazione delle portate drenate è risultato pari a 0.77. Complessivamente, i volumi defluiti attraverso il dreno sono stati ben riprodotti. Questo è una conseguenza del fatto che i volumi drenati sono influenzati principalmente dalle curve di esaurimento delle piene, ben riprodotte dal modello, e solo in maniera marginale dai picchi istantanei di drenaggio.

Per i livelli della falda, il coefficiente EF è stato sempre superiore a 0.75. Anche in questo caso, la tendenza è stata di simulare efficientemente la fase di recessione delle falde osservate in tutti i piezometri monitorati, mentre minore è stata la precisione nel riprodurre i livelli più prossimi alla superficie. Infine, l'umidità media del suolo (media delle tre umidità monitorate dalle sonde TDR) è stata simulata con una efficienza numerica, espressa da EF, pari a 0.76, indicando una positiva capacità del modello di riprodurre anche il contenuto idrico nella fase insatura del suolo.

I risultati delle simulazioni hanno evidenziato il ruolo fondamentale nel bilancio idrico del versante delle perdite idriche laterali verso la porzione di versante ricoperta da macchia mediterranea. Infatti, le perdite simulate ammontano a circa il 28% della precipitazione. Esse risultano incrementate durante i periodi piovosi, quando la falda raggiunge gli strati superiori del suolo più permeabili, facilitando in tal modo la dispersione idrica laterale verso il suolo forestale.

5. Discussione e conclusione

Sono stati presentati i risultati dell'applicazione di un modello idrologico per la simulazione dei deflussi idrici sottosuperficiali saturi, dei livelli di falda e delle umidità del suolo di un ripido versante naturale. Il modello, nella forma monodimensionale, simula i flussi idrici laterali di falda e introduce, per la parte non satura del suolo, una condizione di distribuzione idrostatica delle tensioni e dell'umidità. Quest'ultima semplificazione ha permesso di trascurare la modellazione dei flussi idrici verticali nella zona insatura del suolo, semplificando la struttura computazionale del modello e riducendo il numero dei parametri necessari. I parametri del modello relativi alla conducibilità idraulica ed alla ritenzione idrica del suolo sono stati ottenuti "a priori" utilizzando le serie temporali delle portate, delle altezze di falda e delle umidità monitorate in continuo nel versante stesso. Solo il parametro relativo alle perdite idriche del suolo è stato calibrato sulla base del confronto tra volumi idrici drenati osservati e simulati. L'approccio seguito ha massimizzato l'utilizzo delle informazioni derivanti dal monitoraggio ambientale, che hanno guidato la scelta dei valori dei parametri e hanno rappresentato l'elemento di confronto per la valutazione della qualità delle simulazioni. La procedura utilizzata risulta essere vantaggiosa al fine di valutare correttamente la capacità del modello di riprodurre i processi idrologici del versante. Infatti, riducendo al minimo i parametri soggetti a calibrazione si

minimizza l'incertezza connessa con la loro stima e si esplicita l'effetto che la struttura concettuale semplificata del modello ha sulla qualità delle simulazioni.

Il monitoraggio idrologico effettuato ha evidenziato il comportamento idrologico del versante sia alla larga scala spaziale, attraverso i deflussi sottosuperficiali drenati, sia alla piccola scala, tramite l'osservazione delle fluttuazioni dei livelli di falda e delle umidità del suolo. Il modello di simulazione ha riprodotto in maniera soddisfacente tutti i dati idrologici osservati. Questo è indicativo della capacità del modello di simulare in maniera verosimile sia la risposta idrologica globale del versante, sia le dinamiche idrologiche locali all'interno di esso. Il modello sviluppato si pone quindi come un prezioso ausilio per predire e studiare la risposta idrologica dei versanti naturali. Un futuro sviluppo del modello in forma bidimensionale consentirà la simulazione dei deflussi idrici sottosuperficiali anche in versanti aventi morfologie più complesse. Questo consentirà anche la sua inclusione nelle routine per la simulazione dei processi di generazione del portate idriche superficiali e sottosuperficiali alla scala di bacino idrografico.

Bibliografia

1. Bierkens, M. F. Modeling water table fluctuations by means of a stochastic differential equation. *Water Resources Research*, 34(10), 2485-2499, 1998.
2. Camporese, M., Penna, D., Borga, M., Paniconi, C. A field and modeling study of nonlinear storage-discharge dynamics for an Alpine headwater catchment. *Water Resources Research*, 50(2), 806-822, 2014.
3. Dusek, J., Vogel, T., Dohnal, M., Gerke, H. H. Combining dual-continuum approach with diffusion wave model to include a preferential flow component in hillslope scale modeling of shallow subsurface runoff. *Advances in Water Resources*, 44, 113-125, 2012.
4. Hilberts, A. G. J., Troch, P. A., Paniconi, C. Storage-dependent drainable porosity for complex hillslopes. *Water resources research*, 41(6), 2005.
5. Newman, B. D., Campbell, A. R., Wilcox, B. P. Lateral subsurface flow pathways in a semiarid ponderosa pine hillslope. *Water Resources Research*, 34(12), 3485-3496, 1998.
6. Niedda, M., Pirastru, M., Castellini, M., Giadrossich, F. Simulating the hydrological response of a closed catchment-lake system to recent climate and land-use changes in semi-arid Mediterranean environment. *Journal of Hydrology*, 517, 732-745, 2014.
7. Pirastru, M., Bagarello, V., Iovino, M., Marrosu, R., Castellini, M., Giadrossich, F., Niedda, M. Subsurface flow and large-scale lateral saturated soil hydraulic conductivity in a Mediterranean hillslope with contrasting land uses. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* (65), 297-306, 2017.
8. Pirastru, M., Marrosu, R., Niedda, M., Castellini, M., Bagarello, V., Iovino, M. Osservazione e modellazione del deflusso sottosuperficiale laterale saturo in un ripido versante naturale. *Quaderni di Idronomia Montana*, vol. 34, Edibios: Cosenza; 369-378, 2016.
9. Thomsen, A., Hansen, B., Schelde, K. Application of TDR to water level measurement. *Journal of Hydrology*, 236(3), 252-258, 2000.
10. Weiler, M., McDonnell, J.J., Tromp-van Meerveld, H.J., Uchida, T. Subsurface storm-flow. In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, vol. 3, Anderson MG, McDonnell JJ (eds). Wiley: Chichester; 1719 – 1732, 2005.