

## **UN MODELLO PER LA VALUTAZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE IN TERRENI SUPERFICIALI**

Roberto Valentino, Lorella Montrasio, Gian Luca Losi  
*Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura  
Università degli Studi di Parma  
roberto.valentino@unipr.it, lorella.montrasio@unipr.it, gianluca.losi@unipr.it*

Marco Bittelli  
*Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Ambientali  
Università degli Studi di Bologna  
marco.bittelli@unibo.it*

### **Sommario**

Nella nota viene presentato un modello empirico semplificato che permette la stima del grado di saturazione di terreni superficiali sulla base di dati climatici facilmente disponibili, quali la temperatura dell'aria e l'altezza di pioggia giornaliera. Il modello è stato testato attraverso misure sperimentali del contenuto d'acqua, acquisite con sonde TDR, in tre siti diversi in Emilia Romagna. Nella nota si mostra, in particolare, il confronto tra i dati sperimentali, relativi ad un arco temporale di circa 5 anni, ed i risultati ottenuti attraverso la modellazione semplificata.

### **Introduzione**

La valutazione spazio-temporale del contenuto volumetrico d'acqua o, in alternativa, del grado di saturazione di terreni superficiali (con profondità massima pari a circa 80 cm dal piano campagna), assume una fondamentale importanza in numerosi ambiti: nelle scienze agrarie, per la gestione ed il controllo delle risorse idriche; nelle scienze ambientali e nella chimica del suolo, per il controllo dell'inquinamento; nella meccanica delle terre, per lo studio delle frane superficiali indotte da pioggia; nella modellazione idrologica, per lo studio dell'interazione suolo-atmosfera. Recentemente l'interesse di vari ricercatori si è rivolto sempre più alla definizione di modelli distribuiti basati su variabili atmosferiche, come pioggia e temperatura dell'aria, trascurando le caratteristiche del terreno (Granberg et al., 1999), oppure su equazioni di bilancio idrico, che consentono di tenere in conto, oltre che le proprietà idrauliche del terreno, l'acqua di ruscellamento, l'infiltrazione, l'evapotraspirazione (Pistocchi et al., 2008). Altri modelli più sofisticati, che fanno riferimento a soluzioni delle equazioni di Richards (Iverson, 2000) sono applicabili, data la loro complessità, solo a scala locale o a scala territoriale su aree limitate. Il principale limite dei modelli attualmente disponibili sta nella loro inadeguatezza ad essere utilizzati a scala regionale, sulla base di un ridotto numero di parametri del terreno, facilmente reperibili. Nella presente nota viene sinteticamente descritto un modello semplificato, i cui dettagli sono riportati in Valentino et al. (2011). Tale modello consente di stimare il grado di saturazione del terreno superficiale, sulla base di soli 4 parametri, strettamente correlati con le proprietà fisiche del terreno stesso. Il modello simula cicli annuali multipli e completi del grado di saturazione, a partire da dati climatici ampiamente disponibili, quali la temperatura dell'aria e l'altezza di pioggia. Nella presente nota, per motivi di spazio, vengono mostrati solo alcuni risultati della procedura di validazione, condotta attraverso il confronto tra le simulazioni e i dati sperimentali acquisiti in

terreni superficiali non saturi tipici della Pianura Padana e dell'Appennino Emiliano.

### **I dati sperimentali**

Le misure di campo considerate in questo studio sono state acquisite in 3 diversi siti dell'Emilia Romagna. In ogni sito, la temperatura dell'aria è stata misurata utilizzando la strumentazione Vaisala HMP155A, collocata all'altezza di 2 m rispetto al piano campagna. Il contenuto volumetrico d'acqua è stato determinato, a varie profondità, attraverso sonde TDR (Time Domain Reflectometry) (Campbell Scientific Inc., Logan, Utah). Il primo sito considerato è nella stazione sperimentale dell'ARPA Emilia Romagna presso San Pietro Capofiume (Bologna), dove 7 sonde TDR sono state installate a diverse profondità dal piano campagna. In questo studio sono state considerate le misure relative a soli 2 punti di misura, rispettivamente a 0.1 e 0.25 m di profondità dal piano campagna, in uno strato in cui il terreno è prevalentemente sabbioso. Gli altri due siti sperimentali sono situati nell'Appennino Emiliano, a sud-est di Bologna, presso Ozzano, ad una quota di 200 m s.l.m.. Nella stessa area sono state installate 2 stazioni sperimentali per la misura del contenuto d'acqua, lungo 2 profili caratterizzati da terreno con proprietà distinte. Il primo dei due siti, che verrà nel seguito identificato come Ozzano-C, è caratterizzato da un terreno ad elevato contenuto argilloso, fino ad una profondità di circa 0.8 m; il secondo, invece, che verrà identificato come Ozzano-S, è caratterizzato da un terreno prevalentemente sabbioso fino ad una profondità di circa 0.6 m. Le caratteristiche del terreno nei punti indagati sono riportate in Tabella 1. I due siti sono caratterizzati, inoltre, dalla presenza di vegetazione di tipologia diversa: nel sito Ozzano-C sono presenti varie specie di arbusti e piante erbacee tipiche dell'area appenninica, mentre nel sito Ozzano-S l'area è coltivata a grano turco. Informazioni di dettaglio sulle caratteristiche dei siti sperimentali sono contenute in Pistocchi et al. (2008). Le misure sperimentali consistono in valori giornalieri di contenuto volumetrico d'acqua a diverse profondità su un arco temporale che va da Agosto 2004 a Febbraio 2009 (con una interruzione tra agosto 2006 e luglio 2007) per il sito di S. Pietro Capofiume, e da gennaio 2005 a dicembre 2009 (con un'interruzione tra dicembre 2007 e agosto 2008) per i siti di Ozzano. I periodi di interruzione corrispondono ad un cattivo funzionamento della strumentazione. Ai fini delle nostre analisi, il grado di saturazione effettivo giornaliero del terreno ( $S_e$ ) è stato calcolato sulla base della misura del contenuto volumetrico d'acqua misurato, mediante la ben nota relazione:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [1]$$

dove  $\theta$  è il contenuto volumetrico d'acqua,  $\theta_r$  è il contenuto d'acqua residuo e  $\theta_s$  è il contenuto d'acqua di saturazione. Nel presente lavoro  $\theta_r$  è assunto pari a zero e pertanto il grado di saturazione ( $S_r$ ) è considerato equivalente alla saturazione effettiva ( $S_e$ ).

### **Il modello semplificato**

È ben noto che un certo valore di umidità del suolo è determinato da numerosi e complessi meccanismi fisici quali l'infiltrazione, la redistribuzione dell'acqua nei pori, l'evapotraspirazione, il ruscellamento superficiale e la percolazione profonda. Tali meccanismi sono marcatamente influenzati da forzanti meteorologiche quali la temperatura dell'aria, la velocità del vento, l'umidità relativa dell'aria, la radiazione solare incidente e possono efficacemente essere descritti in termini di bilancio energetico, prendendo in considerazione il flusso di calore scambiato tra suolo ed atmosfera. Il modello che è stato sviluppato, e che sarà brevemente descritto nel seguito, è volutamente semplificato e tale da poter ottenere una valutazione del grado di saturazione della coltre superficiale di terreno

sulla base di grandezze micro-meteorologiche ampiamente disponibili, quali la pioggia e la temperatura dell'aria. Il modello è concepito in modo tale da richiedere un ridotto onere computazionale e la stima di soli 4 parametri legati al terreno. Si suppone di poter esprimere  $S_r$  attraverso la somma di due principali contributi, che, per semplicità, vengono considerati reciprocamente indipendenti: il primo come funzione tempo-variante della temperatura dell'aria ( $T$ ) (in °C), il secondo, che tiene conto dell'infiltrazione, come funzione dell'altezza di pioggia giornaliera ( $h$ ):

$$S_r = S_r(T) + S_r(h) \quad [2]$$

dove

$$S_r(T) = S_{r(in)} \cdot \exp[-\psi \cdot T] \quad [3]$$

$$S_r(h) = \frac{\beta^*}{nH} \cdot \sum_{i=1}^{\omega} h_i^* \cdot \exp[-\xi(t-t_i)] \quad [4]$$

Il primo contributo (Eq. 3) viene espresso attraverso una funzione esponenziale della temperatura dell'aria. Tale legge permette di riprodurre la fluttuazione stagionale di  $S_r$ , che segue, quindi, l'andamento medio della temperatura dell'aria. In realtà la temperatura ha un effetto indiretto sull'umidità del suolo, mentre è una variabile chiave nel processo di evapotraspirazione. Nell'Equazione (3)  $S_{r(in)}$  è un parametro di calibrazione legato allo stato iniziale del terreno, mentre  $\psi$  (°C-1) è un coefficiente numerico, che assume il significato di uno smorzamento, ed è legato alla tipologia di terreno: in particolare, esso avrà un valore più elevato per le sabbie, più basso per le argille e i limi. La variabile  $T$  viene calcolata come media della temperatura giornaliera relativa ad un periodo immediatamente precedente all'istante considerato. A seguito di una procedura di calibrazione, tale periodo di riferimento è fissato in 30 giorni. Il secondo contributo (Eq. 4) esprime il legame diretto tra contenuto d'acqua del suolo e pioggia ed è frutto di una modifica del modello relativo all'*Antecedent Precipitation Index* (API) (Saxton e Lenz, 1967). In particolare, l'Eq. (4) tiene conto della quantità d'acqua effettivamente infiltrata in una colonna di terreno di spessore  $H$  e di porosità  $n$ , attraverso il fattore  $\beta^*$ , che rappresenta la quota parte di pioggia che contribuisce all'incremento del grado di saturazione alle varie profondità. L'Eq. (4) consente anche di tener conto del fatto che l'effetto della pioggia sull'umidità del terreno decresce con il passare del tempo a partire dall'evento piovoso. Tale effetto viene espresso attraverso una legge esponenziale negativa, in cui l'esponente è rappresentato da un parametro numerico di smorzamento ( $\xi$ ), la cui dimensione è l'inverso del tempo. Anche in questo caso tale parametro è caratteristico di ogni tipologia di terreno, in relazione alla permeabilità idraulica specifica. Dal momento che il grado di saturazione, ad ogni intervallo di tempo, dipende dalle piogge pregresse, la funzione viene scritta come somma di una successione di termini corrispondenti a differenti intervalli di tempo ( $t-t_i$ ), in relazione all'altezza di pioggia  $h_i$  dell' $i$ -esimo giorno, sugli  $\omega$  giorni precedenti, in modo da tener conto di un andamento dinamico di  $S_r$ . Nell'ipotesi che la porosità e la struttura del terreno rimangano invariati nel tempo,  $S_r$ , calcolato con la (2) rappresenta il grado di saturazione medio in una colonna di terreno di altezza  $H$ , ma, dopo una procedura di calibrazione separata ad ogni profondità di interesse, tale valore può essere considerato una stima puntuale di  $S_r$  alla profondità  $H$ .

## Risultati e commenti

Il modello descritto è stato applicato a scala puntuale nei siti campione di S. Pietro Capofiume, Ozzano-C e Ozzano-S ed i risultati della modellazione sono stati confrontati con le misure sperimentali. In particolare, la porosità ( $n$ ), i cui valori sono riportati in Tab. 1, è stata ritenuta pari al contenuto d'acqua di saturazione, determinato in laboratorio. I parametri  $\psi$ ,  $\xi$ ,  $\beta^*$  e  $S_{r(in)}$  sono stati determinati tramite una procedura di calibrazione, al fine di ottenere il miglior grado di approssimazione rispetto alle misure sperimentali. In particolare, per ogni sito, i parametri di input sono stati calibrati sulla base delle misure sperimentali relative solo al primo anno (set). Gli stessi parametri, ad eccezione di  $S_{r(in)}$ , sono stati mantenuti costanti per ottenere la predizione delle misure sperimentali relative ai successivi cicli stagionali (pre).

Tabella 1. Caratteristiche del terreno nei siti-campione alle profondità considerate e parametri del modello.

Sito	Prof. (m)	ID	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	$n$	$\psi$ ( $^{\circ}C^{-1}$ )	$\xi$ ( $g^{-1}$ )	$\beta^*$	$S_{r(in)}$
S. Pietro	0.10	SPC_10	62	24	14	0.410	0.048	0.079	0.35	0.76
Capofiume	0.25	SPC_25	61	23	16	0.380	0.036	0.051	0.43	0.93
Ozzano-C	0.20	OZZ_C_20	16	24	60	0.600	0.023	0.077	0.39	0.86
Ozzano-S	0.10	OZZ_S_10	42	33	25	0.410	0.025	0.050	0.31	0.78

In Fig. 1 si riporta l'andamento nel tempo dei valori di  $S_r$  simulati e calcolati per il sito di S. Pietro Capofiume a 0.10 e a 0.25 m di profondità, in relazione alla pioggia giornaliera. Si può notare come il coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) si possa considerare soddisfacente sia per il periodo di calibrazione (Fig. 1a, 1d) sia per i periodi relativi all'analisi predittiva (Fig. 1b, 1c, 1e, 1f). In Fig. 2 si riporta il confronto numerico-sperimentale relativo al sito sperimentale Ozzano-C, in riferimento alla profondità di 0.2 m rispetto al p.c. (Fig. 2a, 2b, 2c) e quello relativo al sito sperimentale Ozzano-S, in riferimento alla profondità di 0.1 m rispetto al p.c. (Fig. 2d, 2e, 2f). Anche in questo caso, per entrambi i siti, il confronto tra i valori simulati e quelli misurati si può considerare soddisfacente tanto per il periodo di calibrazione (Fig. 2a, 2d) quanto per i periodi relativi all'analisi predittiva (Fig. 2b, 2c, 2e, 2f). Il differente comportamento del modello nei tre siti sperimentali e nei diversi periodi sembra essere legato alla presenza di differenti tipologie di vegetazione, che cambiano anche stagionalmente. Tale variabile, tuttavia, non è tenuta in conto dal modello. Le analisi svolte per i punti di misura a profondità maggiori nei tre siti sperimentali, i cui risultati sono riportati in Valentino et al. (2011), dimostrano come l'efficienza del modello diminuisca drasticamente al crescere della profondità.

## Conclusioni

Il modello proposto si dimostra adatto a simulare cicli annuali multipli e completi del grado di saturazione del terreno nella zona insatura, corrispondente agli strati più superficiali di suolo, privo di vegetazione. La presenza della vegetazione, con il conseguente apporto di evapotraspirazione, non è tenuto in conto dal modello, che è volutamente semplificato. Sebbene i risultati appaiano incoraggianti, gli autori sono consapevoli che il modello proposto richieda una ulteriore validazione, sulla base di misure sperimentali provenienti da un numero più cospicuo di siti, al fine di un'efficace applicazione a diverse scale.

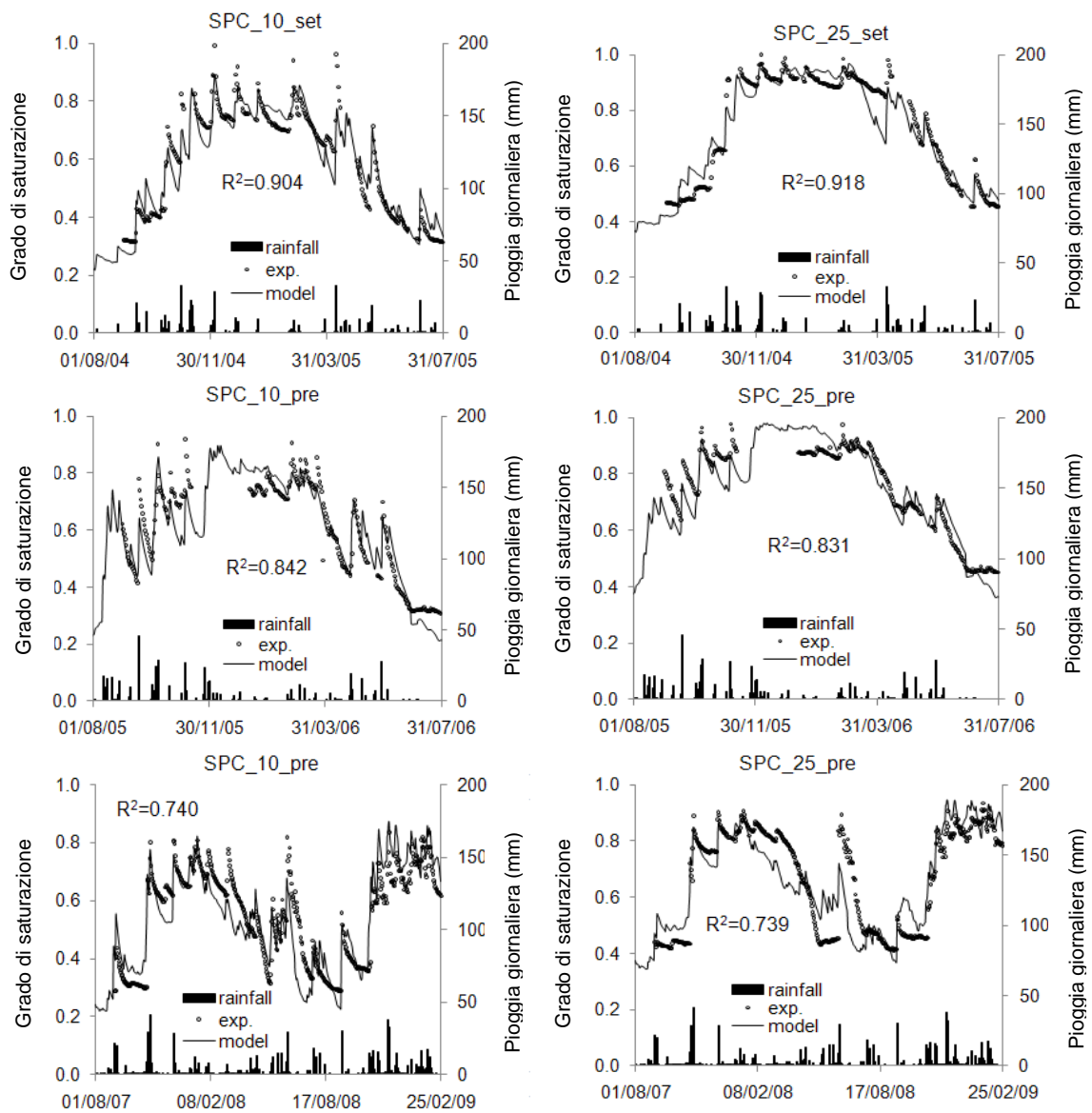


Figura 1. Sito-campione di San Pietro Capofiume. Andamento nel tempo del grado di saturazione in rapporto alla pioggia giornaliera a 0.10 m (SPC\_10) e a 0.25 m dal piano campagna (SPC\_25): (a) e (d) analisi di calibrazione (set); (b), (c), (e), (f) analisi predittive (pre) in riferimento a due diversi periodi..

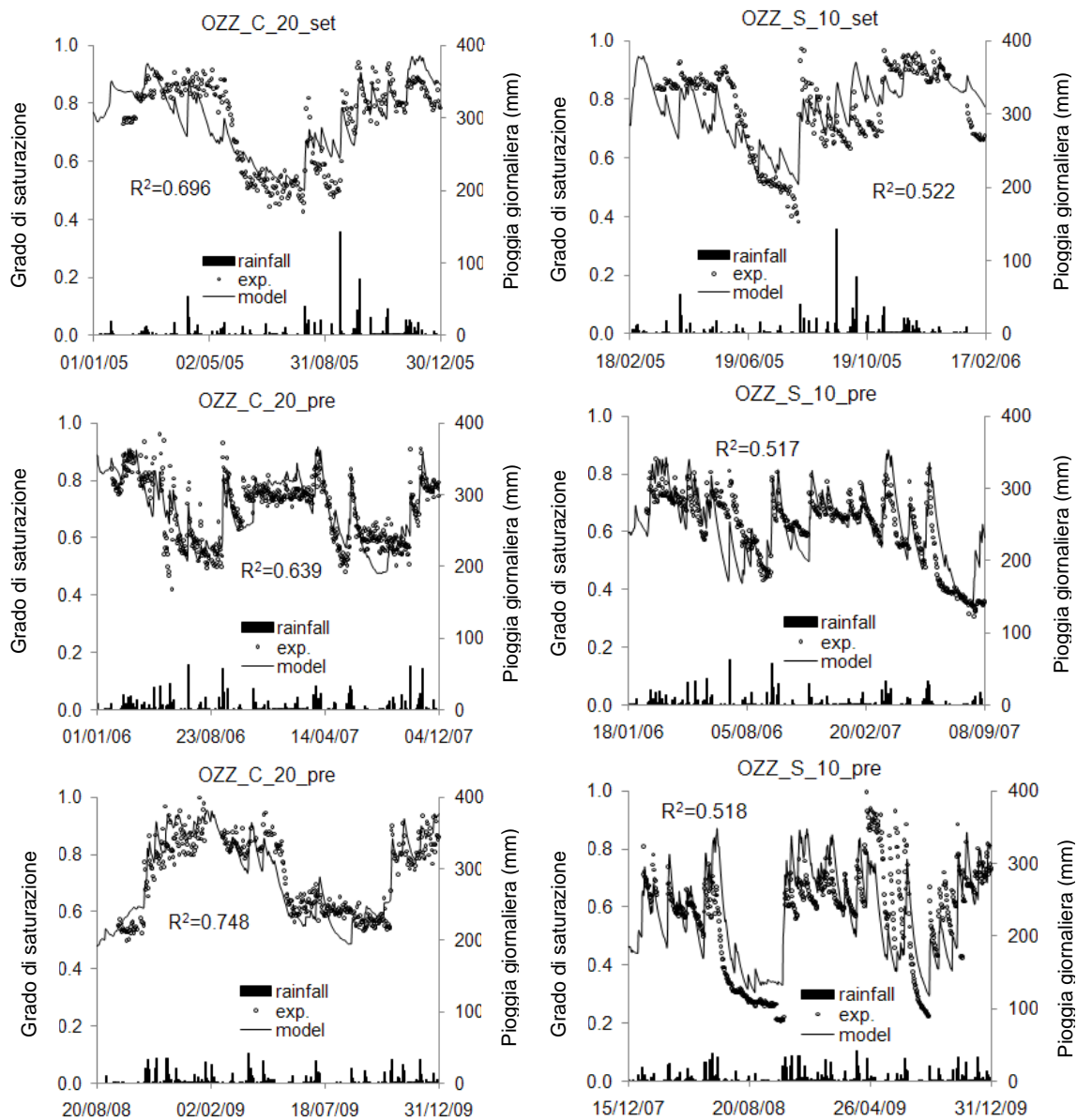


Figura 2. Sito-campione di Ozzano. Andamento nel tempo del grado di saturazione in rapporto alla pioggia giornaliera a 0.20 m dal piano campagna nel sito Ozzano-C (OZZ\_C\_20) e a 0.10 m dal piano campagna nel sito Ozzano-S (OZZ\_S\_10): (a) e (d) analisi di calibrazione (set); (b), (c), (e), (f) analisi predittive (pre) in riferimento a diversi periodi..

## Bibliografia

- Granberg G., Grip H., Löfvenius M.O., Sundh I., Svensson B.H., Nilsson M. (1999). A simple model for simulation of water content, soil frost, and soil temperatures in Boreal mixed mires. *Water Resources Research*, 35(12): 3771–3782.
- Pistocchi A., Bouraoui F., Bittelli M. (2008). A simplified parameterization of the monthly topsoil water budget. *Water Resources Research*, 44, W12440.
- Iverson, R.M. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Res. Research*, 36(7): 1897-1910.
- Saxton K., Lenz A. (1967). Antecedent retention indexes predict soil moisture. *Journal of Hy-draulic Division American Society of Civil Engineers*, 93:223–241.
- Valentino R., Montrasio L., Losi G.L., Bittelli M. (2011). An empirical model for the evaluation of the degree of saturation of shallow soils in relation to rainfalls. *Canadian Geot. Journal*. 48: 795-809.