

**IL SISTEMA "NEWAGE" PER LA PREVISIONE E LA GESTIONE  
DEI BILANCI IDRICA A Scala DI BACINO.  
II – I MODELLI DI GENERAZIONE, AGGREGAZIONE E  
PROPAGAZIONE DEL DEFLUSSO**

G. Formetta<sup>1</sup>, S. Franceschi<sup>2</sup>, A. Antonello<sup>2</sup>, E. Cordano<sup>1</sup>, R. Mantilla<sup>3</sup> & R. Rigon<sup>1</sup>

- (1) Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Trento, Italia, e-mail: formetta@ing.unitn.it
- (2) HydroloGIS - Soluzioni Open Source per l'Ambiente - Via Siemens 9, 39100 Bolzano email: info@hydrologis.com
- (3) IIHR- Hydroscience & Engineering The University of Iowa C. Maxwell Stanley, Hydraulics Laboratory Iowa City, Iowa 52242-1585 U.S.A, email: ricardo-mantilla@uiowa.edu

**SOMMARIO**

*In questa memoria si presenta il modello idrologico semi-distribuito NewAge focalizzando l'attenzione sul bilancio idrologico. Tale sistema informatico è costituito da cinque parti principali: la stima del bilancio energetico e dell'evapotraspirazione, modello neve, la stima del bilancio idrologico a scala di versante, ed infine l'aggregazione e la propagazione delle portate nei canali. Il sistema si basa su una metodologia hillslope-link quindi la sua unità elementare è costituita non dal generico pixel ma dall'hillslope che drena nell'unico link ad esso associato. In tale memoria viene analizzata la modellazione del bilancio di massa e dell'aggregazione delle portate nei canali. Essa si basa su un'appropriata modifica del modello Duffy (1996) in modo da tener in considerazione il ritardo nell'apportato dei deflussi sia lungo gli hillslopes che lungo i canali. Infine viene mostrata un'applicazione del modello al sottobacino del fiume Adige Passirio.*

**1 INTRODUZIONE**

La previsione idrologica nel corso del tempo si è concentrata dapprima sulla determinazione delle portate di piena; sin dal modello razionale *Mulvaney*, 1850 ma, più recentemente con i vari modelli dell'idrogramma istantaneo unitario (*Sherman*, 1932, *Doodge*, 1959), anche geomorfologico (*Rodriguez-Iturbe & Valdes*, 1979, *Gupta et Waymire*, 1980, *Rosso*, 1984, *Rinaldo et al.*, 1991, 1995, *D'Odorico e Rigon*, 2003). Persino modelli di formazione dei deflussi nei versanti come TOPMODEL (Beven e Kirkby, 1979; Beven, 2001; Franchini et al., 1996) sono stati usati prevalentemente a questo scopo. Il recente progetto "Distribute Model Intercomparison Project", DMIP, (*Smith et al.*, 2004) ha posto in luce molte varianti dei modelli elencati, e, una più spiccata attenzione alla previsione dell'intero idrogramma, anziché del solo idrogramma di piena: elemento evidentemente necessario per la gestione complessiva dei bacini e in

particolare per la gestione delle portate di magra. In effetti, i modelli citati (ma anche molti altri), con vari gradi di complessità, non solo sono prevalentemente rivolti alla previsione delle piene, ma forniscono i valori di portata in un solo punto del reticolo, alla cosiddetta chiusura del bacino, e non in un insieme di punti, come sarebbe più logicamente richiesto dalla gestione dei bacini, lasciando alla modellazione statistica regionalizzata questo obiettivo.

Il modello NewAge, (Antonello et al., 2010, Franceschi et al, 2010 a,b, Endrizzi et al, 2010) è stato concepito e strutturato per rispondere alle esigenze di previsioni, non solo delle piene, ma anche delle magre e per riprodurre bilanci idrici in più punti all'interno e alla chiusura di un bacino. Per ottenere questi risultati, il modello implementa una suddivisione del bacino in versanti e canali (hillslope-link structure), dove i versanti sono le unità idrologiche fondamentali alla cui scala sono risolti i bilanci di energia e di massa d'acqua ed i canali sono descritti come elementi (features) vettoriali tra loro topologicamente interconnessi. Per ragioni computazionali, la dissezione del territorio non è usualmente spinta sino all'estremo di identificare tutti i versanti fisicamente presenti nel sistema ma ci si ferma a definire delle unità idrologiche elementari la cui dimensione, nella presente ricerca, è mediamente di 2-3 Km<sup>2</sup>.

Un *link* altro non è che il tratto di rete di competenza di ogni bacino elementare. La suddivisione del bacino secondo hillslope-link, individua in modo naturale delle parti modellistiche che consentono di valutare la produzione del deflusso superficiale e subsuperficiale, che però tengono in conto anche degli elementi di influenza antropica sulla regimazione delle portate, e quindi di fenomeni come le immissioni di portate, di eventuali dighe, canali artificiali ed opere di presa irrigue.

Di come tutti questi elementi siano implementati nel sistema NewAGE, si descrive in Franceschi et al. (2010).

Gli elementi che competono alla produzione del deflusso nei versanti, alla sua aggregazione nella rete di canali sono invece descritti nel seguito.

In particolare i sotto-modelli di NewAge integrati in J-Grass che competono a questa parte sono: il modello di interpolazione di dati meteorologici, "meteo-interpolator", il calcolo del bilancio idrologico, detto "adige", ed infine il modulo di propagazione delle piene, detto "saintgeo".

Specificatamente, la presente memoria descrive il modulo "adige".

## 2 METODI

Il modello qui utilizzato ricalca, con alcune varianti, Duffy (1996). In pratica, si considera l'integrazione dell'equazione di continuità sui volumi parziali occupati dalla porzione satura e insatura di un versante, come un sistema dinamico nelle due variabili di stato rappresentate dai volumi immagazzinati per unità di area nel sistema saturo, S1 [L], e insaturo, S2 [L]. Le equazioni usate, sono per lo più lineari e, quelle ritenute non lineari sono approssimate da funzioni polinomiali del secondo ordine (Duffy, 1996). Nel modello NewAge le equazioni dei due invasi sono accoppiate e sono responsabili della generazione del deflusso, mentre il deflusso vero e proprio, è descritto con un modello di ritardo cinematico per tempi di residenza (Rinaldo, A. & I. Rodriguez-Iturbe, 1996). Il deflusso prodotto da ciascun versante viene poi propagato mediante un modello

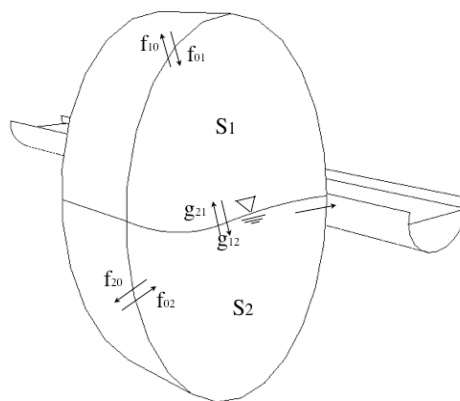
semplificato, derivato dal modello CUENCAS (*Mantilla and Gupta, 2005*), essenzialmente una variante del modello Muskingum-Cunge, che rappresenta l'equazione di deflusso in ogni singolo canale. Il sistema di equazioni che ne risulta permette di conoscere una stima del valore della portata in ogni link del reticolo idrografico.

## 2.1 Generazione del deflusso

Suddividendo un volume di terreno in una parte insatura, individuata dal pedice 1, e in una satura, dal pedice 2, e schematizzando la falda come contorno mobile che separa i due strati di terreno, le equazioni di continuità portano a definire il seguente sistema rappresentato in fig. 1:

$$\begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = f_{01} - g_{12} - f_{10} \\ \frac{dS_2}{dt} = f_{02} + g_{12} - f_{20} \end{cases} \quad (1)$$

dove  $S_1$  [L] ed  $S_2$  [L] rappresentano rispettivamente il volume d'acqua nel suolo insaturo e in quello saturo per unità di area di versante;  $f_{01}$  [L/T] e  $f_{10}$  [L/T] sono i flussi, rispettivamente in entrata ed in uscita, tra il volume di suolo non saturo e l'ambiente esterno;  $f_{02}$  [L/T] ed  $f_{20}$  [L/T] sono i flussi, rispettivamente in entrata ed in uscita, tra il volume di suolo saturo e l'ambiente esterno;  $g_{12}=g_{21}$  [L/T] rappresenta il flusso tra i due volumi di terreno. Per le relazioni costitutive che legano i flussi alle variabili di stato del sistema si fa riferimento a *Duffy (1996)* e *Mantilla & Gupta (2005)* e a *Franceschi et al. (2010)* dove le relazioni, in seguito presentate sono descritte nel dettaglio.



**Figura 1.** Schematizzazione del modello di generazione del deflusso nel sistema NewAge.

Le forme funzionali utilizzate per esprimere i termini delle funzioni introdotte nella

eq. (1) sono le seguenti:

$$f_{01} = p \cdot [1 - d_4 \cdot (S_2 - S_2^0)] \quad (2)$$

$$f_{00} = p \cdot A_s = d_4 \cdot (S_2 - S_2^0) \quad (3)$$

$$g_{12} = d_0 \cdot (S_1 - S_1^0) + d_1 \cdot (S_1 + d_2) \cdot (S_2 - S_2^0)^2 \quad (4)$$

$$f_{20} = d_3 \cdot (S_2 - S_2^0) \quad (5)$$

dove  $p$  [L/T] sono le precipitazioni,  $S_1^0$  [L] e  $S_2^0$  [L] sono i volumi d'acqua residui per unita' di area rispettivamente nell'insaturo e nel saturo,  $A_s$  è la frazione di area del versante che ha raggiunto la saturazione ed  $f_{00}$  è la parte di precipitazione che va in deflusso superficiale. I termini  $d_i$  sono parametri che devono essere positivi.

Si noti che il termine di ricarica tra  $S_1$  ed  $S_2$ ,  $g_{12}$  contiene una relazione non lineare di un termine che accoppia le due variabili di stato, mentre i flussi esterni ( $f_{01}$  e  $f_{02}$ ) sono relazioni lineari. Anche la relazione tra area satura e volume d'acqua nel sistema saturo e' lineare.

Il modello rappresenta il meccanismo di creazione del deflusso per eccesso di saturazione nel quale  $(p - f_{01})$  rappresenta il deflusso superficiale sulla porzione di area superficiale satura. Il termine  $f_{20}$  rappresenta il deflusso generato dalla parte satura, tanto maggiore quanto più grande è l'invaso.

I parametri del modello  $S_1^0$  ed  $S_2^0$  sono, come già anticipato, i volumi di acqua residui nel caso di versante drenato totalmente a gravità e con precipitazione nulla ( $p=0$ ).

I parametri  $d_0$ ,  $d_1$ , e  $d_2$  descrivono la forma della relazione di ricarica del versante che accoppia le due variabili di stato. I parametri relativi ai flussi esterni hanno tutti un significato fisico:  $d_3$  è la costante di deflusso subsuperficiale, mentre  $d_4$  mette in relazione l'estensione della superficie satura,  $A_s$ , con il volume saturo del terreno.

## 2.2 Ritardo nell'apporto dei deflussi

Il ritardo cinematico dei deflussi superficiale e sub superficiale prodotti dal versante ed affluiti al nodo di un generico tratto di rete può essere trascurato (Duffy, 1996) solo se i bacini considerati sono di grandissime dimensioni (e.g. D'Odorico & Rigon, 2003 e Botter & Rinaldo, 2003).

Nel modello NewAge, il ritardo cinematico nei deflussi introdotto dai versanti è calcolato per mezzo della teoria dell'idrogramma istantaneo unitario e definendo:

$$q_{sup}(t) = \int_0^t IUH_{sup}(t - \tau) \cdot f_{00}(\tau) d\tau \quad (6)$$

$$q_{sub}(t) = \int_0^t IUH_{sub}(t - \tau) \cdot f_{20}(\tau) d\tau \quad (7)$$

dove  $IUH_{sub}(t)$   $IUH_{sup}(t)$ , con dimensioni  $[T^{-1}]$  sono gli idrogrammi unitari istantanei variabili nel tempo sia per il contributo superficiale che subsuperficiale. In questi calcoli la velocità dei due deflussi è diversa, mentre per la superficiale si hanno valori di 0.1-0.4 m/s per la velocità di deflusso subsuperficiale si utilizza una velocità calcolata sulla base della legge di Darcy mediata sui percorsi:

$$v_{sub} = \bar{k}_s \cdot \frac{\bar{\nabla z}}{A} \quad (8)$$

dove  $\bar{k}_s$ ,  $[L/T]$ , è la conducibilità idraulica media  $[L/T]$ ,  $\bar{\nabla z}$ ,  $[L]$ , rappresenta la pendenza media ed  $A$ ,  $[L^2]$  la superficie del versante. In pratica  $\bar{k}_s$  diventa, in pratica, un parametro di taratura per il deflusso subsuperficiale modulato sulla morfologia dei versanti.

Gli idrogrammi unitari istantanei,  $IUH$ , vengono calcolati sulla base delle funzioni d'ampiezza riscalate (Rinaldo et al, 1995; D'Odorico & Rigon, 2003) che sono variabili nel tempo, in funzione di  $A_s$ , e per ogni sottobacino. Per altro il modello non usa direttamente tali funzioni, che dovrebbero essere assegnate per punti, ma le interpola per ogni singolo versante mediante opportuni idrogrammi di Nash (1957). Quest'ultimi, in particolare, associano la distribuzione gamma a quella esponenziale e vengono così definiti:

$$IUH(t) = \frac{1}{k \cdot \Gamma(n+1)} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^n \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (9)$$

nella quale  $k$   $[T]$  è il tempo medio di residenza nei versanti ed  $n$ , originariamente il numero di serbatoi, è un secondo parametro di taratura. In NewAge, media e varianza della funzione di Nash sono ricavate da media e varianza della funzione d'ampiezza per ogni bacino per diversi livelli di saturazione (diversi valori di  $A_s$ ), una volta assegnate le velocità di deflusso superficiale e subsuperficiale. I parametri da inserire nell' eq. (9) diventano cose:

$$k = \frac{\sigma^2}{\mu} \quad (10)$$

$$n = \frac{\mu}{k} - 1 \quad (11)$$

dove  $\sigma^2$  e  $\mu$  rappresentano la varianza e la media della distribuzione dei tempi di residenza di ogni versante per un dato livello di umidità.

Nell'implementazione si considerano livelli discreti di saturazione dell'intero bacino a cui fare riferimento per l'inserimento dei valori di media e varianza della funzione d'ampiezza. In particolare sono richiesti 3 valori di questi parametri per il deflusso superficiale che fanno riferimento rispettivamente al bacino in condizioni di umidità molto bassa, media e alta. Per il deflusso subsuperficiale viene richiesto solo un valore che farà riferimento a condizioni di umidità media, considerando che tutta l'area sia, uniformemente, produttrice del deflusso subsuperficiale.

### 2.3 Aggregazione del deflusso

Il modello di generazione del deflusso nei versanti recapita la portata alla rete idraulica che il modello concettualizza come un grafo ad albero orientato. Per ognuno dei link l'equazione di continuità è:

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = K(Q_i(t)) \cdot [A \cdot R_i(t) + Q_{trib}(t) - Q_i(t)] \quad i = 1, 2, \dots, H \quad (12)$$

$$R_i(t) = q_{sub}(t) + q_{sup}(t) \quad i = 1, 2, \dots, H \quad (13)$$

dove,  $H$  è il numero di link della rete,  $Q_i(t)$  [L/T] rappresenta la portata di output relativa a link considerato,  $K(Q_i(t))$  [1/T] è il coefficiente di propagazione di Chezy,  $R_i(t)$  [L/T] è l'intensità di deflusso per unità di area dai versanti a monte di quello considerato,  $Q_{trib}$  [L<sup>3</sup>/T] sono i flussi che provengono dai link a monte di quello considerato ed  $A$  rappresenta l'area drenante nel link considerato.

L'espressione per il coefficiente di propagazione implementata nel modello adige è:

$$K(Q) = \frac{3}{2} \cdot Q_{sp}^{1/3} \cdot C^{2/3} \cdot b^{-1/3} \cdot l^{-1} \cdot i_f^{1/3} \quad (14)$$

nella quale:  $C$  [L<sup>1/3</sup>/T] è il coefficiente di Chezy,  $b$  [L] ed  $l$  [L] rappresentano la larghezza e la lunghezza media del link considerato,  $i_f$  [-] è la pendenza media del link e  $Q$  [L<sup>3</sup>/T] è la portata nel canale.

Per una discussione più specifica dei termini contenuti nell'eq. (14) si rimanda a *M. Menabde and M. Sivapalan (2001)* e *R. Mantilla et al. (2005)*.

### 3 APPLICAZIONI

Nel seguito, si presenta una applicazioni preliminare del modello NewAge relativa al Passirio, tributario del fiume Adige e rappresentato in figura (2). La scelta di tale sottobacino del fiume Adige è dettata dal fatto che contiene l'unico idrometro misurante una portata non influenzata da immissioni, scarichi o derivazioni ma dovuta unicamente al deflusso naturale.

La calibrazione è stata effettuata manualmente: in una prima fase capendo l'influenza del singolo parametro sull'output del modello e successivamente, scelti i parametri più influenti, si procede a farli variare contemporaneamente in modo da minimizzare lo scarto tra la portata misurata e quella simulata dal modello.

Nella prima applicazione in fig.(3), quella invernale, il periodo di simulazione va dal 1/10/2008 al 31/03/2009. Il modello viene calibrato sul primo mese di simulazione e, determinati i parametri "ottimi", viene applicato per i successivi cinque.

L'evapotraspirazione è stata considerata costante per tutto il periodo di interesse.

Il periodo di calibrazione, caratterizzato dall'alternanza di giorni piovosi e giorni con assenza di precipitazione, come mostrato in fig.(3), consente la calibrazione del modello sia in fase di evento meteorico che in assenza.

In estate il modello è stato testato per il periodo che va dal 01/06/2009 al

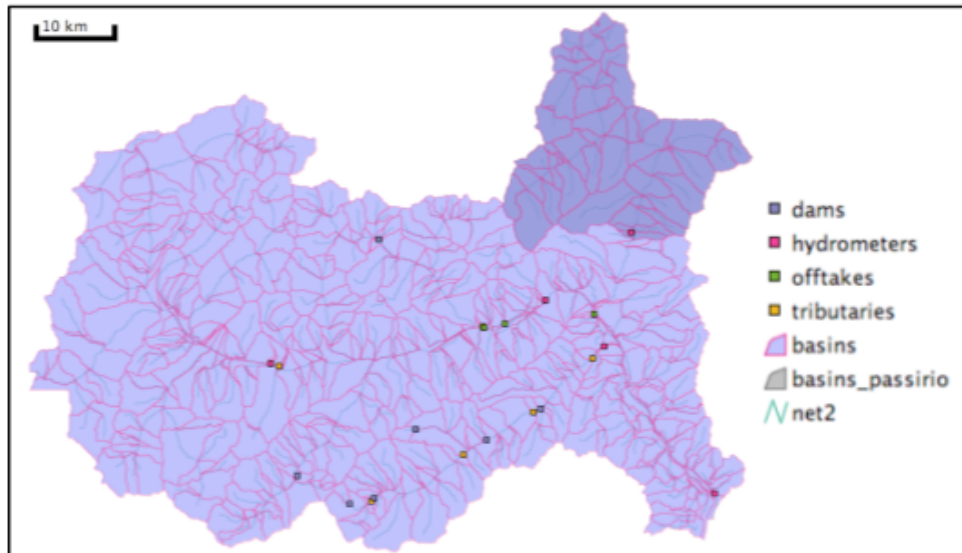
31/07/2009. Anche in questa simulazione il primo mese è quello in cui viene realizzata la calibrazione mentre il successivo viene simulato con i parametri stimati in precedenza. I risultati della simulazione estiva e il corrispondente ietogramma di pioggia sono riportati rispettivamente in fig. (4).

Nei grafici la curva nera continua rappresenta la portata misurata mentre quella nera tratteggiata rappresenta quella simulata con il modello.

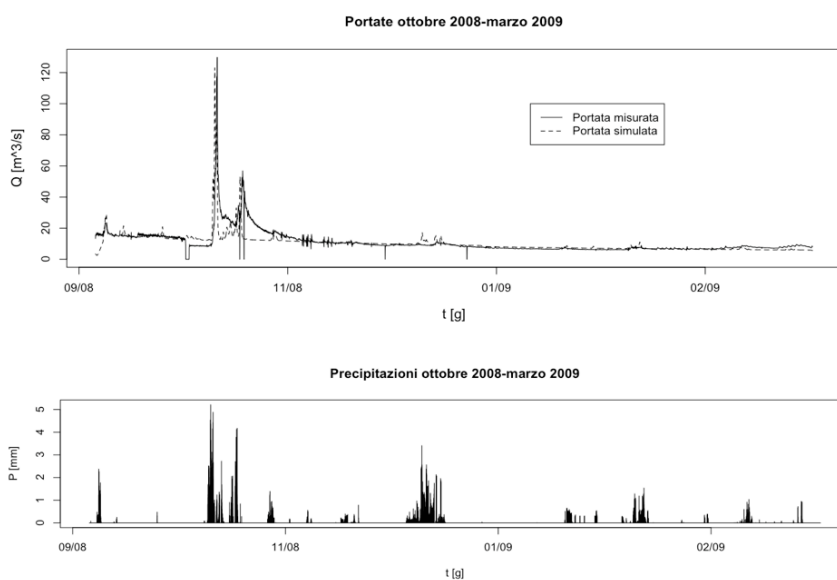
Infine nella Tabella 1 sono riportati i valori dei parametri principali, delle rispettive unità di misura e dei valori stimati per la simulazione invernale e estiva.

Parametro	Unità di Misura	Simulazione estiva	Simulazione invernale
Velocità superfic.	[m/s]	1	0.8
Velocità subsuperfic.	[m/s]	0.08	0.08
Conducibilità Idr. Sat.	[m/h]	3.6	4.6
Tasso di evapotraspir.	[-]	0.006	0.001
Profondità media falda	[m]	2.5	3.2

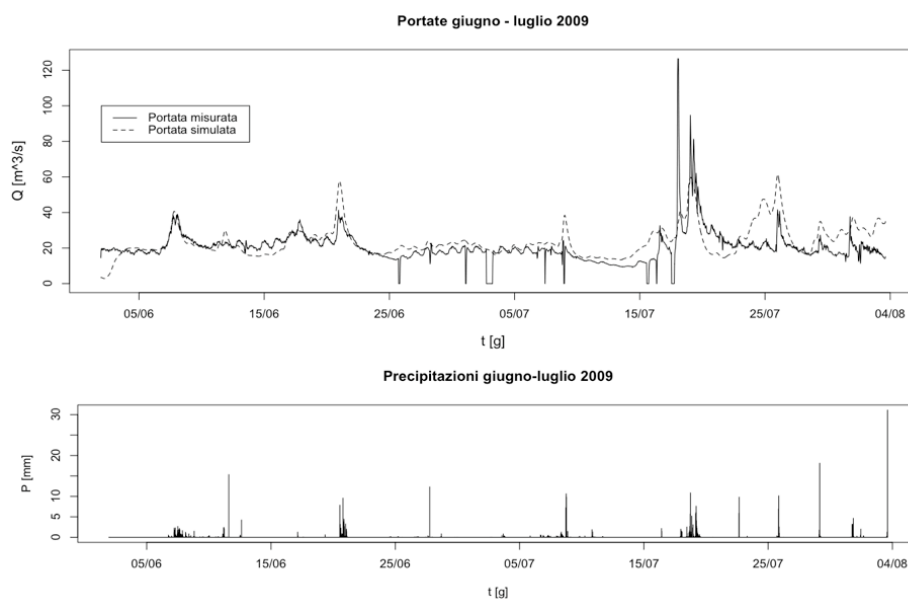
**Tabella 1.** Principali parametri usati nelle simulazioni



**Figura 2.** Rappresentazione del bacino dell'Adige (in chiaro) e del Passirio chiuso al Saltusio (in scuro)



**Figura 3.** Applicazione del modello NewAge dal 10/01/2008 al 31/03/2009: la curva continua rappresenta l'idrogramma misurato mentre quella tratteggiata l'idrogramma simulato.



**Figura 4.** Applicazione del modello NewAge dal 01/06/2009 al 30/07/2009: la curva continua rappresenta l'idrogramma misurato mentre quella tratteggiata l'idrogramma simulato



#### **4 CONCLUSIONI E DISCUSSIONE**

In riferimento alle applicazioni presentate si può notare la buona capacità del modello NewAge di riprodurre l'andamento delle portate osservate sia nei periodi siccitosi che in quelli piovosi. Le discordanze registrate in queste analisi preliminari sono attribuibili a cause molteplici tra le quali l'uso di calibrazione manuale, possibile sottostima delle precipitazioni nette dovuta alla scarsità di stazioni di misura sul territorio e particolarmente evidente nelle previsioni effettuate sugli eventi di fine luglio 2009. Se certamente, miglioramenti alle capacità predittive del modello potranno essere apportati usando tecniche di calibrazione automatiche che permetteranno una migliore esplorazione dello "spazio dei parametri", è chiaro che alcune differenze tra portate misurate e simulate sono senz'altro da affrontare nell'ambito di un riesame dei volumi di precipitazione per mezzo di strumenti di assimilazione dei dati o dell'utilizzo di immagini radar, nel tentativo di asseverare la presenza di sistemi di precipitazione localizzati di tipo convettivo. Ciò nonostante, la calibrazione manuale può servire a trarre alcune buone considerazioni sui parametri del modello. Eseguendo simulazioni su periodi lunghi, anche annuali, parametri come velocità del deflusso superficiale e subsuperficiale, porosità, frazione di portata uscente dai ghiacciai da considerare come deflusso superficiale e subsuperficiale sono viste subire variazioni minime durante l'anno idrologico e si possono considerare pressochè costanti nella durata delle simulazioni, con una qualche diversità tra mesi estivi e mesi invernali. Lo stesso non è assolutamente vero per parametri come la conducibilità idraulica e l'evapotraspirazione, qui costante, le cui variazioni durante l'anno idrologico, influenzano e di molto i risultati del modello.

**Ringraziamenti.** La presente ricerca è stata finanziata dall'Autorità di Bacino dell'Adige e dal progetto "Morfeo" dell'ASI che supporta uno degli Autori. Gli autori ringraziano Davide Giacomelli per il supporto dato nel reperimento e acquisizione dei dati.

## BIBLIOGRAFIA

- Antonello, A., Franceschi S. e Rigon R. JGrass3: manuale utente, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Trento, 2010
- Beven, 2001a Beven, K.J. Rainfall-runoff modelling: the primer, Wiley, Chichester, 2001a.
- Beven, 2001b Beven, K.J., 2001b. How far can we go in distributed hydrological modelling?, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 1–12.
- Beven, 2001c K.J. Beven, On hypothesis testing in hydrology, *Hydrological Processes (HPToday)* 15 (2001), pp. 1655–1657.
- Beven, K.J. e M.J. Kirkby, A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Science Bulletin* 24, 43-69, 1979.
- Botter, G., Rinaldo, A, Scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion. *Water Resour. Res.*, 39, 10, 1286. 2003.
- D’Odorico, P. and R. Rigon. 2003. *Hillslope and channel distributions to the hydrologic response*, *Water Resour. Res.*, 39(5)
- Dodge JCI. 1959. A general theory of the unit hydrograph. *Journal of Geophysical Research* 64:241–256.
- Duffy, C. J. (1996), A Two-State Integral-Balance Model for Soil Moisture and Groundwater Dynamics in Complex Terrain, *Water Resour. Res.*, 32(8), 2421–2434.
- Endrizzi, S., Formetta G, Franceschi S., Antonello A. e Rigon R., Il sistema NewAge per la previsione e la gestione dei bilanci idrici a scala di bacino. III - Il bilancio di energia e della neve, Atti XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e di Costruzioni Idrauliche, Palermo 2010.
- Franceschi S., Antonello A., Formetta G., Giacomelli D. Rigon R., NewAge: manuale d’uso, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Trento, 2010
- Gupta V.J., E.Waymire E., and Wang C.T. (1980). A representation of an IUH fom geomorphology. *Water Resour.Res.*, 16, 885-892.
- Franchini, M., Wendling, J., Obled, Ch. & Todini, E. (1996) Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *J. Hydrol.* 175, 293-338.
- Ricardo Mantilla, Vijay K. Gupta, A GIS Framework to Investigate the Process Basis for Scaling Statistics on River Networks - *Geoscience and Remote Sensing Letters*, Volume 2, Number 4, 2005.
- Michael B. Smith, Dong-Jun Seo, Victor I. Koren, Seann M. Reed, Ziya Zhang, Qingyun Duan, Fekadu Moreda, Shuzheng Cong, The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design, *Journal of Hydrology*, Volume 298, Issues 1-4.
- Mulvaney, T.J. (1850). On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations on the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. *Transactions of Institution of Civil Engineers Ireland*, 4, 18-31
- Rodriguez-Iturbe, I and J.B. Valdes, The geomorphological structure of hydrogeological response, *Water Resources Research*, 15, 1409-1420, 1979.
- Rosso, R., Nash model relation to Horton order ratios, *Water Resour. Res.*, 20(7), 914-920, 1984.
- A. Rinaldo, R. Rigon and A. Marani, *Water Resour. Res.* 27, 513 (1991); A. Marani, R. Rigon and A. Rinaldo, 27, 3041 (1991).
- Rinaldo, A. & I. Rodriguez-Iturbe, The geomorphological theory of the hydrologic response, *Hydrol. Processes*, 10(6), 803-844, 1996.
- Sherman, L.K. (1932). Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Eng.News Record*, 108, 501-505.