

MODELLI AFFLUSSI DEFLUSSI PER PICCOLI BACINI IDROGRAFICI NON STRUMENTATI

Andrea Petroselli¹, Salvatore Grimaldi^{1,2}, Gustavo Alonso³, Fernando Nardi^{1,2}

- (1) Dipartimento GEMINI, Università degli Studi della Tuscia, via S. Camillo de Lellis snc, Viterbo 01100, e-mail: salvatore.grimaldi@unitus.it, petro@unitus.it, fernando.nardi@unitus.it
- (2) Honors Center of Italian Universities (H2CU), University of Rome La Sapienza, via Eudossiana 18, Rome 00184, Italy.
- (3) Agrophysics Research Unit. Agrarian University of Havana, San José de las Lajas, La Habana, Cuba.

SOMMARIO

In questo lavoro si presenta un'applicazione su piccoli bacini non strumentati di un modello afflusso deflussi di tipo geomorfologico per la determinazione dell'idrogramma unitario istantaneo (IUH) basato sulla funzione di ampiezza (WF) risalata rispetto le velocità di versante e di canale (WFIUH). L'aspetto innovativo del modello proposto consiste nella caratterizzazione automatica - fisicamente e spazialmente distribuita - dei tempi di percorrenza dei deflussi superficiali su versante. A tal fine sono utilizzate alcune formule empiriche che permettono la stima della velocità in funzione della pendenza, dell'uso del suolo e dell'area contribuyente, parametri di facile determinazione dai dati territoriali digitali. In tal modo, lo schema proposto permette di definire il modello WFIUH con un unico parametro di calibrazione, la velocità di deflusso canalizzato.

Nel caso di studio descritto i risultati ottenuti con il modello proposto si confrontano con quelli dei tradizionali modelli geomorfologici GIUH e con i valori osservati di portata.

1 INTRODUZIONE

La definizione dell'onda di progetto in piccoli bacini non strumentati è un argomento di notevole interesse principalmente nella mappatura del rischio idraulico. Per "piccolo" si intende un bacino idrografico di dimensione minore di 150-200 Km² ove si ritiene ragionevole l'ipotesi di linearità e quindi opportuna l'applicazione della teoria dell'IUH. Per "non strumentato" si intende invece un bacino per il quale non si dispongono misure di portata mentre si presume siano disponibili supporti cartografici digitali per la topografia (modelli digitali del terreno, DEM) e per l'uso del suolo (i.e. CORINE, 2000).

La determinazione non solo del picco, ma anche del volume, del tempo di base e la

forma dell'idrogramma di piena hanno un'influenza significativa nella identificazione delle aree inondabili specialmente alla luce della sempre più larga applicazione dei modelli idraulici di propagazione bidimensionale per l'aggiornamento dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) sia per il reticolo principale, che per il secondario ed il minore (Nardi *et al.*, 2008b).

In tale contesto, i modelli geomorfologici di tipo IUH, quali il GIUH e il WFIUH (e.g. Rodriguez-Iturbe & Valdes, 1979; Rodriguez-Iturbe e Rinaldo, 1997, Giannoni *et al.*, 2005; Kumar *et al.*, 2007; Noto & La Loggia, 2007), risultano i più efficaci per la determinazione dell'idrogramma di piena, soprattutto per la sempre crescente disponibilità ed accuratezza di dati ed algoritmi GIS per l'estrazione automatica dei parametri geomorfologici necessari. Partendo dall'assunto che l'IUH di un bacino coincida con la distribuzione dei tempi di residenza di tutti i punti/celle dello stesso, il GIUH esprime la risposta impulsiva unitaria in funzione dei parametri hortoniani e di un solo parametro di calibrazione, la velocità media di deflusso su canale. Il limite di tale approccio è che tali parametri sono definiti a scala di bacino e di conseguenza la forma dell'IUH si presenta sempre molto mediata. Il modello WFIUH invece interpreta letteralmente il precedente assunto stimando nel dettaglio cella-cella i valori dei tempi di percorrenza del deflusso. Ciò avviene costruendo la funzione di ampiezza del bacino e riscalandola rispetto a due velocità: "canale" e "versante" da attribuire in misura costante alle celle classificate come "canale" e "versante". Nonostante il modello mostri dei risultati migliori rispetto al GIUH tradizionale, riuscendo a cogliere un maggior dettaglio della componente geomorfologica, presenta due parametri incogniti di calibrazione (Franchini & O'Connell, 1996; Botter & Rinaldo, 2003; Saco & Kumar, 2004; Giannoni *et al.*, 2005).

Il presente contributo ha origine da un recente lavoro (Petroselli *et al.*, 2009; Grimaldi *et al.*, in review;) in cui sono stati analizzati alcuni schemi empirici per la definizione cella-cella della velocità sul versante verificando che, nonostante la semplice natura delle formule utilizzate, alcune di esse permettono di definire in maniera realistica la componente cinematica dei versanti basandosi su poche grandezze fisiche, senza necessitare di alcun parametro di calibrazione. In tal modo, è possibile avere un modello WFIUH con una sola variabile incognita: la velocità da attribuire alle celle "canale" oppure una velocità media a scala di bacino. A tale nuova versione del modello, basato su un solo parametro di velocità, ci riferiremo per l'appunto con l'acronimo WFIUH-1par.

Il presente testo è organizzato come segue: nel paragrafo 2 si descrive il caso di studio sul quale sono sviluppate le applicazioni; le procedure utili ad un corretto preprocessamento del DEM, le procedure per la definizione del WFIUH e per la stima della componente cinematica di versante sono riassunte nel paragrafo 3. Il paragrafo 4 infine illustra e commenta i risultati ottenuti.

2 DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO

Per l'analisi in esame si è scelto un bacino di dimensioni limitate, in modo che sia più verosimile l'ipotesi di linearità e per il quale siano disponibili un numero sufficiente di eventi osservati di precipitazione-portata di intensità variabile.

Il bacino selezionato è un sottobacino del Trinity River Basin (Texas, U.S.A.),

sotteso dalla stazione 'North Creek - Jacksboro' (lat. 33°16'57"; long. 98°17'53"), con un'area di drenaggio di 58.96 Km². Esso è stato classificato come appartenente alla categoria 'small ruralsheds database', in quanto caratterizzato da ridotta attività antropica. Per le applicazioni del presente lavoro sono stati selezionati 7 eventi di piena registrati dal 1959 al 1979. Per definire la pioggia netta, la portata netta ed il tempo di corrivazione di un evento si è applicata la seguente procedura:

- 1) Applicazione di un filtro ricorsivo (Lyne & Hollick, 1979; Nathan & McMahon, 1990) sulle portate lorde per la separazione dell'idrogramma in deflusso di base e deflusso di piena:

$$Q_d(t) = \beta Q_d(t-1) + \frac{1+\beta}{2} [Q(t) - Q(t-1)] \quad (1)$$

dove $Q(t)$ e $Q(t-1)$ rappresentano la portata lorda al tempo t e al tempo $t-1$, $Q_d(t)$ e $Q_d(t-1)$ rappresentano la portata netta al tempo t e al tempo $t-1$ (all'istante iniziale la portata netta è assunta nulla) e β rappresenta il parametro del filtro scelto in modo da identificare al meglio il punto di inflessione della curva di esaurimento del deflusso totale.

- 2) Depurazione delle piogge utilizzando il metodo SCS-CN (USDA, 1986; Chow *et al.*, 1988), adottando un Curve Number (CN) tale che il volume di pioggia netta sia pari al volume netto defluito precedentemente stimato;
- 3) Stima del tempo di corrivazione del singolo evento registrato come differenza tra il tempo che intercorre tra il termine della pioggia netta ed il termine del deflusso netto.

In figura 1 è mostrato il DEM (risoluzione di 30 m) mentre in tabella 1 sono riassunte le caratteristiche morfometriche del bacino. In tabella 2 sono invece riportate le caratteristiche degli eventi registrati.

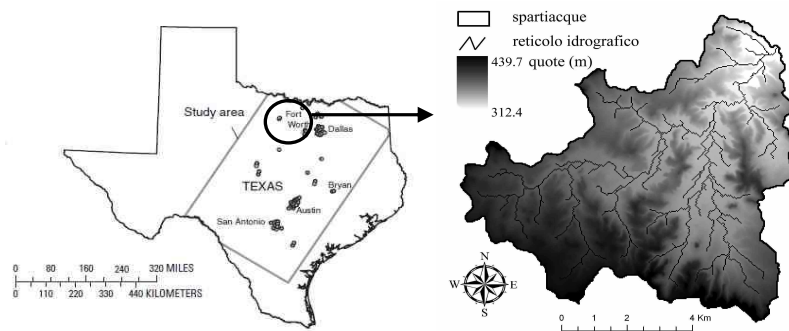


Figura 1. DEM del Trinity River Basin, North Creek - Jacksboro.

3 METODOLOGIA PER LA DEFINIZIONE DEL GIUH E WFIUH-1PAR

Una prima fase, comune ai due modelli geomorfologici, è un accurato preprocessamento del DEM che permetta una corretta stima dei parametri e grandezze necessarie.

Di seguito sono sintetizzate le principali analisi utili alla scelta della direzione di

deflusso, alla correzione dei “*pit*” e delle aree piane, all’estrazione automatica del reticolo idrografico (le *routines* implementate in linguaggio ESRI - ArcMap sono disponibili sul sito www.gistar.org):

- 1) rimozione dal DEM di depressioni artificiali (*pit*) e aree pianeggianti tramite il modello fisicamente basato PEM4PIT (Grimaldi et al., 2007; Nardi et al., 2008a; Santini et al., 2009);
- 2) identificazione delle direzioni di deflusso tramite un metodo monodirezionale non dispersivo (Nardi et al., 2008a)
- 3) estrazione automatica del reticolo idrografico con il metodo della *drop analysis* abbinato al criterio della curvatura (Tarboton et al., 1991; Tarboton & Ames, 2001).

area (Km ²)	58.96
quota minima (m)	312.4
quota massima (m)	439.7
quota media (m)	373.5
pendenza minima (%)	0
pendenza massima (%)	43.9
pendenza media (%)	5.2

Tabella 1: Caratteristiche morfometriche del bacino oggetto di studio

numero evento	data	durata evento	β	VND	Q max netta	Tp netta	Tc stimato
(-)	(mm-gg-aa)	(ore)	(-)	(mm)	(mc/s)	(ore)	(min)
1	06-09-1962	25.5	0.996	44.1	220.9	27.3	360
2	09-07-1962	14.0	0.996	8.5	27.9	22.8	600
3	05-29-1964	19.0	0.997	16.8	45.8	3.3	365
4	11-18-1964	4.3	0.995	7.7	44.0	6.0	390
5	05-29-1967	25.0	0.998	10.5	32.0	31.3	600
6	05-11-1972	4.0	0.993	13.8	109.7	2.5	210
7	10-30-1974	14.3	0.994	11.2	57.7	21.0	325

Tabella 2: Caratteristiche degli eventi precipitazione-portata registrati: la durata si riferisce agli eventi di precipitazione già depurati dalle perdite; VND: volume netto defluito. Tp: tempo di picco della portata netta. Tc: tempo di corrivazione.

Noto il reticolo idrografico è possibile stimare i parametri hortoniani e quindi il modello GIUH (Rodriguez-Iturbe & Valdes, 1979; Gupta et al., 1980; Rodriguez-Iturbe et al., 1982), espresso nella formulazione di Rosso (1984):

$$GIUH(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k} \right)^{n-1} e^{-\frac{t}{k}} \quad (2)$$

$$n = 3.29R_b^{0.78} R_a^{-0.78} R_l^{0.07} \quad (3)$$

$$k = 0.70 \frac{L_{max}}{vc} R_b^{-0.48} R_a^{0.48} R_l^{-0.48} \quad (4)$$

dove R_b , R_a e R_l rappresentano rispettivamente i rapporti di biforcazione, delle aree e delle lunghezze, L_{max} la lunghezza del tratto di ordine massimo del bacino e vc la velocità ipotizzata all'interno dei canali. Nel presente lavoro la velocità dei canali è stata scelta in modo tale che il tempo di base del GIUH coincida con il tempo di corrimazione stimato per il singolo evento registrato. Essendo per definizione il GIUH asintotico sull'asse delle ascisse e tendente all'unità, si è ipotizzato tale valore come coincidente con il 99% del valore cumulato del GIUH. (Franchini & O'Connell, 1996)

La definizione del WFIUH-1par comporta invece le seguenti ulteriori fasi:

- 4) estrazione della *Flow Length*, la distribuzione spaziale delle distanze idrologiche dalla sezione di chiusura (ossia le distanze misurate lungo il percorso individuato dalle direzioni di deflusso) dalla quale si estrae la funzione d'ampiezza del bacino (WF);
- 5) determinazione di un campo di velocità spazialmente distribuito; nel presente lavoro si sono utilizzati due approcci (Grimaldi et al., in review): l'approccio NRCS (National Research Conservation Service - ex SCS) secondo il quale:

$$v = a\sqrt{S} \quad (5)$$

dove v rappresenta la velocità del deflusso sulla singola cella 'versante' del DEM, S la pendenza (adimensionale) della singola cella, a un coefficiente funzione dell'uso del suolo (Haan et al., 1994; McCuen, 1998); per $S > 0.04$, ad S si sostituisce il seguente termine S' :

$$S' = 0.05247 + 0.06363 \cdot S - 0.182 \cdot e^{-62.38S} \quad (6)$$

Il secondo approccio utilizzato in questo lavoro, di seguito denominato VMaidment (Maidment et al., 1996), è espresso tramite la relazione:

$$v = \frac{V_{mean}}{[S^b A^c]_{mean}} S^b A^c \quad (7)$$

dove v rappresenta la velocità della cella (la formula è applicabile, a differenza della (5), sia per le celle 'canale' che per le celle 'versante'), V_{mean} la velocità media in tutto il bacino, S la pendenza della singola cella, A l'area contribuyente della singola cella, b e c coefficienti con valori suggeriti pari a 0,5 (Maidment et al., 1996). Il denominatore rappresenta il valor medio del prodotto delle mappe $S^b * A^c$.

Per evitare valori non-realistici delle velocità di deflusso nelle singole celle si stabilisce un intervallo di ammissibilità, qui fissato in 0.02-2 m/s per le celle versante, nell'utilizzo di (5), (6) e (7), e in 0.5-5 m/s per le celle canale, nell'utilizzo di (7);

- 6) 'riscaldamento' della *Flow Length* per ottenere la *Flow Time* (per definizione la mappa dei tempi di residenza dalla sezione di chiusura, cioè l'IUH) dividendo i percorsi di drenaggio per le rispettive velocità di percorrenza; l'operazione di 'riscaldamento' viene eseguita per il primo approccio (NRCS) adottando la mappa delle velocità di versante ottenuta tramite la (5) e la (6) ed assumendo

un'opportuna velocità costante per le celle 'canale' (parametro incognito del modello); mentre per il secondo approccio l'operazione di 'riscalatura' viene eseguita su tutte le celle del bacino adottando la mappa delle velocità ottenuta tramite la (7) ed assumendo come parametro incognito il valore di V_{mean} .

L'analisi proposta valuta le prestazioni dei modelli GIUH e WFIUH-1par in condizioni ideali cioè presupponendo la conoscenza degli eventi a priori. Di conseguenza i valori dei parametri incogniti (vc_{GIUH} , vc_{NRCS} , V_{mean}) sono stati ricavati tramite una procedura iterativa imponendo sul singolo evento che l'esaurirsi dell'IUH avvenga in coincidenza del tempo di corrivazione stimato sui dati piovgeportate misurati.

4 RISULTATI E COMMENTI

I risultati dell'applicazione dell'analisi preliminari sul bacino per l'estrazione del reticolo idrografico e la determinazione dei parametri hortoniani e morfometrici sono riportati in tabella 3.

lunghezza asta principale (km)	18.02
distanza massima spartiacque - outlet (km)	18.47
rapporto di biforcazione R_b (-)	3.26
rapporto delle lunghezze R_l (-)	1.81
rapporto delle aree R_a (-)	3.53
ordine massimo del bacino (-)	6
lunghezza asta ordine massimo L_{max} (km)	4.68

Tabella 3: Parametri morfometrici estratti del DEM del bacino in esame

Nella figura 2 si mostrano a scopo esemplificativo le mappe di velocità ottenute sia con l'approccio NRCS che con $VM_{aidment}$ relative all'evento del 05-29-1964; per tale evento i valori dei parametri incogniti sono pari rispettivamente a 1.1 m/s per la velocità di canale (NRCS) e 0.14 m/s per la velocità media in tutto il bacino ($VM_{aidment}$), mentre per quanto riguarda il GIUH la condizione del 99% viene raggiunta per una velocità nel reticolo idrografico pari a 0.79 m/s. In tabella 4 si mostrano i valori dei parametri incogniti ottenuti per tutti gli eventi a disposizione. Nella figura 3 si mostrano gli idrogrammi unitari istantanei ottenuti con le 3 metodologie precedentemente descritte, sempre per l'evento del 05-29-1964; è evidente la differenza tra l'approccio GIUH e i due WFIUH-1par, nonostante le dimensioni molto contenute del bacino (circa 60 Km²). Si nota come i WFIUH-1par forniscano una informazione di maggiore dettaglio rispetto a quella GIUH che appare decisamente più mediata. Tale comportamento è costante in tutti gli eventi analizzati.

Nella figura 4 si mostrano invece gli idrogrammi finali per i 7 eventi selezionati. Si nota che la convoluzione delle precipitazioni nette e l'IUH applicato non ha ridotto le differenze tra i tre metodi descritti. I modelli WF mostrano una maggiore "dinamicità del segnale", caratteristica emersa già in figura 3. E' apprezzabile inoltre una buona corrispondenza tra i valori di picco nonostante che la qualità del dato, il processo di separazione delle componenti di deflusso e il processo di depurazione delle perdite

sicuramente abbiano negativamente condizionato l'applicazione.

In tabella 5 sono mostrati, per un breve confronto riassuntivo, i valori di portata di picco e di tempo al picco osservati e simulati per tutti gli eventi con le relative differenze percentuali rispetto ai valori osservati.

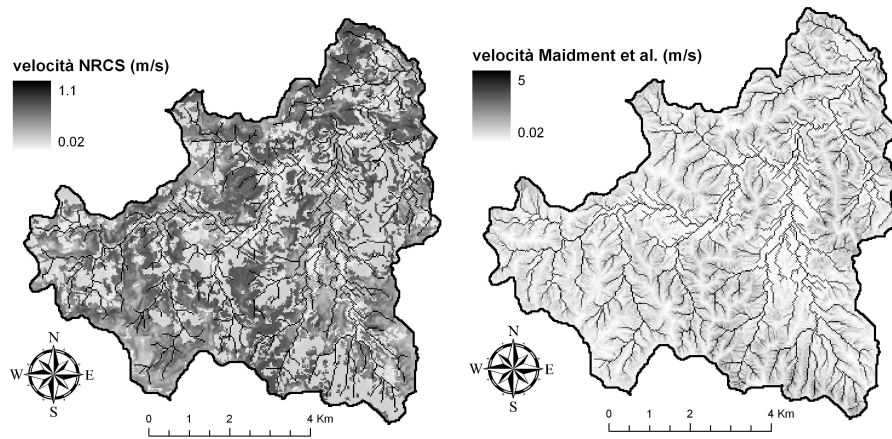


Figura 2. Evento del 05-29-1964: mappe di velocità cella a cella.

eventi	data	V_{mean} ($VM_{aidment}$) (m/s)	V_c NRCS (m/s)	V_c GIUH 99% (m/s)
1	06-09-1962	0.145	1.10	0.79
2	09-07-1962	0.075	0.60	0.48
3	05-29-1964	0.140	1.10	0.79
4	11-18-1964	0.130	1.00	0.73
5	05-29-1967	0.075	0.60	0.48
6	05-11-1972	0.270	2.80	1.33
7	10-30-1974	0.160	1.25	0.90

Tabella 4: Tempi di corrvazione stimati sugli eventi e valori dei parametri che conducono al singolo tempo di corrvazione stimato.

num.	WFIUH $VM_{aidment}$				WFIUH NRCS				GIUH			
ev.	Qp	ΔQ	Tp	ΔTp	Qp	ΔQ	Tp	ΔTp	Qp	ΔQ	Tp	ΔTp
(-)	(mc/s)	(%)	(ore)	(%)	(mc/s)	(%)	(ore)	(%)	(mc/s)	(%)	(ore)	(%)
1	204.4	-7.5	28.0	2.8	181.6	-17.8	28.8	5.5	157.4	-28.7	27.8	1.8
2	27.3	-2.1	19.3	-15.4	21.4	-23.3	20.8	-8.8	19.9	-28.8	19.5	-14.3
3	44.0	-4.0	3.5	7.7	40.2	-12.2	3.8	15.4	32.0	-30.1	3.0	-7.7
4	45.8	4.3	4.5	-25.0	43.2	-1.6	5.3	-12.5	38.2	-13.1	4.5	-25.0
5	30.9	-3.4	31.8	1.6	26.7	-16.5	33.0	5.6	23.0	-28.0	30.8	-1.6
6	102.6	-6.5	4.3	70.0	111.6	1.7	4.0	60.0	73.4	-33.1	4.0	60.0
7	44.4	-23.1	20.0	-4.8	42.2	-26.9	20.3	-3.6	36.3	-37.1	19.5	-7.1

Tabella 5: Valori riassuntivi delle simulazioni; Qp: portata di picco simulata; Tp: tempo di picco della portata simulata. ΔQ , ΔTp : differenze percentuali tra portate di picco e tempi di picco rispetto al dato 'osservato'.

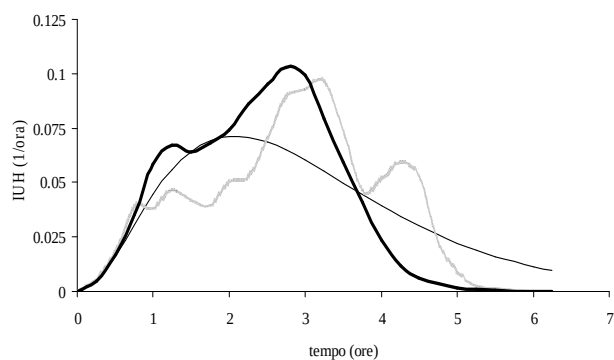
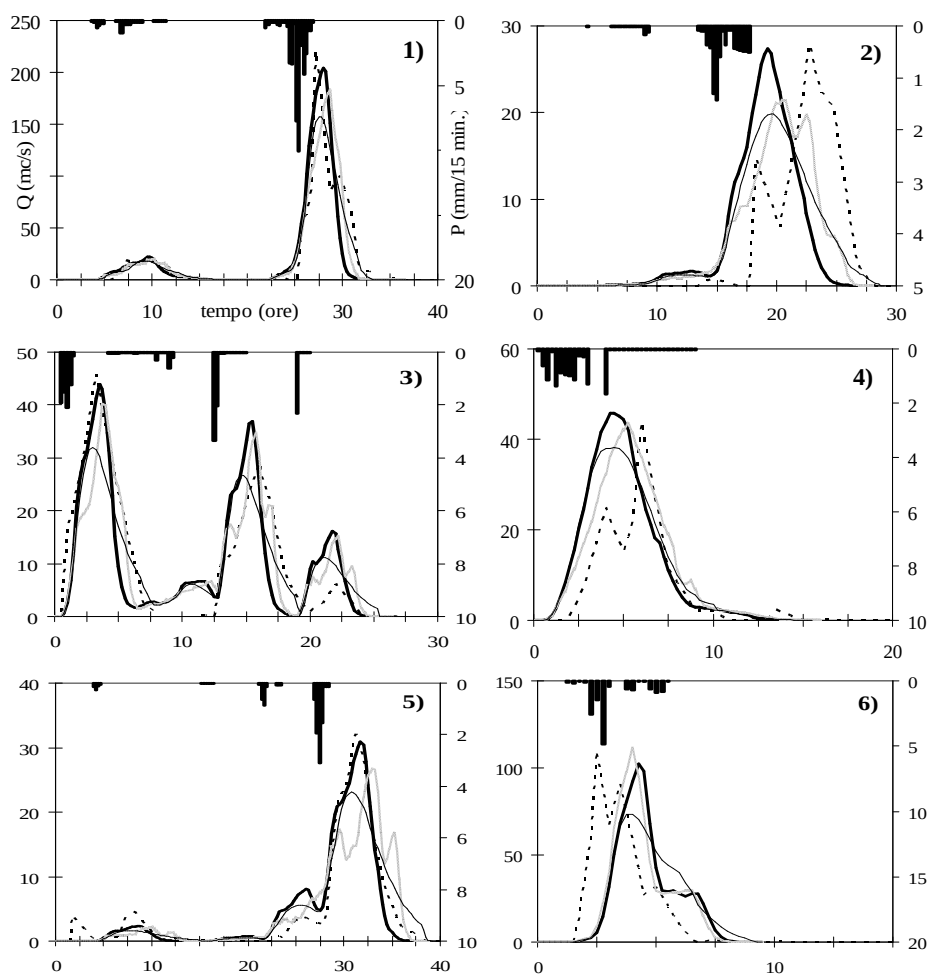


Figura 3. IUH per l'evento del 5/29/1964 (numero 3): linea nera sottile = GIUH; linea grigia spessa = WFIUH – NRCS; linea nera spessa = WFIUH – VMaidment



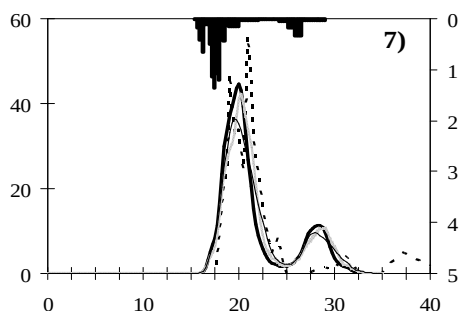


Figura 4. Confronto tra gli eventi osservati, GIUH e WFIUH-1par per i 7 eventi selezionati: linea tratteggiata = idrogramma netto ‘osservato’; linea nera sottile = GIUH; linea grigia spessa = WFIUH – NRCS; linea nera spessa = WFIUH – VMaidment.

5 CONCLUSIONI

In questo lavoro si presenta un confronto tra un modello geomorfologico GIUH e un’evoluzione del modello WFIUH ottimizzato per la riduzione dei parametri di calibrazione.

I due modelli sono applicati su un piccolo bacino idrografico del Texas per i quali sono disponibili osservazioni relative a sette eventi di piena. L’unico parametro incognito presente nei due modelli è stimato imponendo il tempo di corrivazione determinato direttamente dai singoli eventi. I risultati ottenuti confermano che l’approccio WFIUH riesce a cogliere maggiori informazioni dalla topografia del bacino fornendo una migliore rappresentazione dell’onda di piena osservata.

Importante sottolineare che la nuova versione descritta WFIUH-1par necessita di un solo parametro di calibrazione. In aggiunta, con l’obiettivo di evitare che l’analista scelga il parametro in maniera soggettiva, in questo lavoro si è investigata la possibilità di condizionare tale parametro al tempo di corrivazione. Nonostante quest’ultimo sia un parametro fortemente aleatorio ed oramai anacronistico, è necessariamente utilizzato in una fase precedente alla trasformazione afflussi-deflussi (definizione precipitazione di progetto) per cui si ritiene che l’evoluzione WFIUH-1par espressa in funzione del tempo di corrivazione possa essere di sicuro interesse per la definizione delle onde di progetto per bacini non strumentati.

BIBLIOGRAFIA

- Botter, G., Rinaldo, A., Scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion. *Water Resour. Res.*, 39, 10, 1286, doi:10.1029/2003WR002154, 2003.
- Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Civil Engineering Series, 1988.
- CORINE project, 2000. CORINE (Coordination of Information on Environment) Database, a key database for European integrated environmental assessment. Programme of the European Commission, European Environmental Agency (EEA).
- Franchini, M., O’Connel P.E.. An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Journal of Hydrology*, 175, pp. 407-428, 1996.

- Giannoni F., Roth G., Rudari R. A procedure for drainage network identification from geomorphology and its application to the prediction of the hydrologic response, *Advances in Water Resources*, 28 (6), pp. 567-581, 2005.
- Grimaldi, S., Nardi, F., Di Benedetto, F., Istanbuluoglu, E., Bras, R. L. A physically based method for removing pits in digital elevation models. *Advances in Water Resources*, 30, 2151-2158, 2007
- Grimaldi S., Petroselli A., Nardi F., Alonso G. Flow Time estimation with variable hillslope velocity in ungauged basins, in review su *Advances in Water Resources*, 2010.
- Gupta, V.K., Waymire E. and Wang, C.T. Representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resour. Res.*, 16(5): 855-862. 1980.
- Haan, C.T., Barfield, B.J., Hays, J.C., 1994. Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments, Academic Press, New York.
- Kumar R., Chatterjee C., Singh R.D., Lohani A.K., Kumar S. Runoff estimation for an ungauged catchment using geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUM) models. *Hydrological Processes*, 21 (14), pp. 1829-1840, 2007.
- Lyne V, Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. Institute of Engineers Australia National Conference. Publ. 79/10, pp. 89-93, 1979.
- Maidment, D.R., Olivera, F., Calver, A., Eatherall, A. Unit Hydrograph derived from a spatially distributed velocity field, *Hydrological Processes*, 10, pp 831-844. 1996.
- McCuen, R.H., 1998. Hydrologic Design and Analysis; Prentice Hall, New Jersey.
- Nardi, F., Grimaldi, S., Santini, M., Petroselli, A., Ubertini, L. Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using DEMs: the flat area issue, *Hydrological Science Journal*, 53(6), pp. 1176-1193, December 2008a.
- Nardi F., O'Brien J.S., Cuomo G. Garcia R., Grimaldi S. Updating flood maps using 2D models in Italy: A case study, *Flood Risk Management: Research and Practice*, Samuels et al. (editors), Taylor & Francis group, London, 2008b.
- Nathan R.J., McMahon T.A. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis. *Water Resources Research*. 26(7): pp 1465-1473, 1990.
- Noto, L.V., La Loggia, G. Derivation of a Distributed Unit Hydrograph Integrating GIS and Remote Sensing. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 639-650, 2007.
- Petroselli A., Nardi F., Santini M., Grimaldi S. Modello afflussi – deflussi WFIUH: metodologia innovativa per l'applicazione in bacini non strumentati, Atti del IX convegno nazionale AIIA; Ischia Porto, 12-16 settembre 2009.
- Rodriguez-Iturbe I., Valdes J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resour. Res.* 15, pp 1409-1420. 1979.
- Rodriguez-Iturbe I, Rinaldo, A. Fractal River Basins: Chance and Self-Organization (Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- Rodriguez-Iturbe I., Gonzalez-Sanabria M, Bras. R. A geomorphoclimatic theory on the Instantaneous Unit Hydrograph, *Water Resour. Res.* 18(4), pp 877-886. 1982.
- Rosso, R. Nash model relation to Horton order ratios. *Water Resources Research* 20 (7), pp. 914-920, 1984.
- Saco P.M., Kumar P. Kinematic dispersion effects of hillslope velocities. *Water Resour. Res.*, 40, W01301, doi:10.1029/2003WR002024, 2004.
- Santini M., Grimaldi S., Nardi F., Petroselli A., Rulli M.C. Pre-Processing algorithms and landslide modelling on remotely sensed DEMs, *Geomorphology*, 113 (1-2), pp. 110-125, 2009.
- Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe. On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrol. Processes*, 5(1), 81- 100. 1991
- Tarboton D.G., and Ames D.P. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data, in World Water and Environmental Resources Congress, Orlando, Florida, May 20-24, ASCE. 2001.