

## EFFETTI DI URBANIZZAZIONE E CAMBIAMENTI CLIMATICI SUI DEFLUSSI A SCALA DI BACINO

*Dario Pumo<sup>1</sup>, Antonio Francipane<sup>1</sup>, Elisa Arnone<sup>1</sup>, Domenico Caracciolo<sup>1</sup>, Francesco Viola<sup>2</sup>, Leonardo Valerio Noto<sup>1</sup> & Goffredo La Loggia<sup>1</sup>*

*(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, Edificio 8, 90128, Palermo, Italy; (2) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura, Università degli Studi di Cagliari, Via Marengo, 2, 09123, Cagliari, Italia*

### ASPETTI CHIAVE:

- *La progressiva impermeabilizzazione dei suoli ed i cambiamenti climatici attesi possono avere pesanti ripercussioni sulla risposta idrologica dei bacini, specie quando tali dinamiche si sovrappongono*
- *Viene qui proposto un framework modellistico basato sull'applicazione di un modello idrologico, sotto opportuni scenari sintetici di transitorio, e sull'analisi delle relative serie di deflusso*
- *Tale procedura è atta ad individuare i più efficaci indicatori per l'identificazione e la valutazione dei cambiamenti idrologici indotti da eventuali pressioni antropiche e/o naturali*

### 1 PREMESSA

Fra le pressioni di natura antropica agenti sui bacini idrografici, particolare rilevanza hanno sia la progressiva perdita di suoli naturali in favore di suoli poco, o per nulla, permeabili (es. strade, edifici, parcheggi, etc.) che la regimazione e regolazione dei deflussi sulla rete di drenaggio naturale mediante interventi idraulici. In particolare, l'ultima relazione sullo stato dell'ambiente europeo a cura dell'Agenzia Europea dell'Ambiente (AEA, 2010) considera l'impermeabilizzazione dei bacini naturali come uno dei maggiori processi di degrado del suolo. L'aumento del grado di urbanizzazione dei bacini naturali, inteso come aumento della frazione impermeabile del suolo derivante della costante copertura di aree del bacino con materiali impermeabili artificiali come asfalto e cemento, è un fenomeno in costante crescita a livello globale e rappresenta spesso un compromesso fra esigenze sociali, economiche e ambientali diverse.

A tali cambiamenti si sovrappongono i cambiamenti climatici in atto, dovuti all'innalzamento della concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub>, che, fra gli effetti principali, tendono a modificare la quantità e la modalità con cui le piogge arrivano al suolo e, al contempo, inducono alterazioni al regime termometrico, con importanti ripercussioni sui processi evapotraspirativi caratterizzanti i bacini idrologici. Pressioni naturali e pressioni antropiche sui sistemi idrologici spesso coesistono ed interagiscono mutualmente, contribuendo a determinare quelli che vengono definiti come 'cambiamenti idrologici' (Ceola *et al.*, 2014), ovvero modificando dinamicamente la maggior parte dei processi alla base della formazione e del trasferimento dei deflussi. In particolare, i primi risultano particolarmente sensibili alle pressioni naturali, come i cambiamenti climatici, mentre alle pressioni di natura antropica è spesso imputabile, come effetto principale, l'alterazione dei meccanismi di trasferimento del deflusso (Miller *et al.*, 2014).

Uno dei metodi più diffusi per valutare l'effetto congiunto di eventuali pressioni naturali e antropiche sui deflussi, è rappresentato dall'analisi delle serie temporali dei deflussi osservati, anche se la valutazione del diverso peso che le due diverse pressioni possono avere, rimane di difficile determinazione mediante tale approccio. Una metodologia più efficace sembra essere l'utilizzo di modelli idrologici per simulare gli effetti di diversi scenari di cambiamento sulla risposta idrologica. Esplorando tale approccio, l'obiettivo di questo lavoro è quello di presentare un framework modellistico atto a valutare in che misura l'applicazione di trend noti, sulle forzanti climatiche da un lato e sul grado di impermeabilizzazione dall'altro, possa influenzare la risposta idrologica di un bacino.

### 2 MATERIALI E METODI

#### 2.1 Procedura metodologica

La metodologia proposta prevede l'applicazione ad un caso studio di tipo sintetico in cui, mediante la generazione di opportuni scenari sintetici 'di transitorio', vengono simulati gli effetti dei cambiamenti

idrologici indotti da pressioni naturali (alterazione del regime termo-pluviometrico) e antropiche (aumento del grado di urbanizzazione), agenti separatamente e in maniera combinata. A tal fine viene utilizzato il tRIBS (Ivanov et al., 2004), un modello idrologico particolarmente adatto agli scopi prefissi in quanto concepito come un ‘laboratorio virtuale’ per analisi spazialmente distribuite (Bras et al., 2003), dal momento che tiene conto esplicitamente dei pattern spaziali dell’uso del suolo, oltre che del ruolo della topografia nella redistribuzione dei flussi laterali di umidità del suolo. L’applicazione, in fase prototipale, viene condotta sul bacino reale del *Baron Fork* (OK, USA), per il quale il tRIBS è stato calibrato e più volte validato (Noto et al., 2008; Liuzzo et al., 2009; Caracciolo et al., 2014).

Lo studio dei cambiamenti idrologici indotti, viene effettuato a partire dall’analisi e il confronto fra serie di deflusso relative agli scenari di transitorio (combinazione di diversi scenari climatici e di uso del suolo generati a partire da trend osservati a livello globale) e la serie di deflusso relativa ad uno scenario stazionario di riferimento (*Baseline*), creato a partire dai dati climatici e di uso suolo realmente osservati per il caso studio selezionato. L’eventuale presenza di trend viene valutata mediante il test non parametrico di Mann-Kendal, relativamente a diversi indicatori ricavati dalle serie orarie e aggregate a scala giornaliera, mensile e annuale, valutandone anche l’entità mediante il Sen’s Slope Estimator.

## 2.2 Modello idrologico: tRIBS

Il tRIBS (*TIN-based Real-time Integrated Basin Simulator*), è un modello idrologico a parametri distribuiti e fisicamente basato, che utilizza le informazioni spazialmente distribuite, quali pedologia, uso/copertura dei suoli e precipitazione per simulare i principali processi idrologici di un bacino. Il modello simula in continuo l’interazione dei flussi idrici sulla superficie del suolo, nella zona insatura e nell’acquifero enfatizzando le relazioni dinamiche tra la zona insatura e la zona satura e utilizzando le interazioni tra i fronti di infiltrazione e la posizione variabile della falda idrica. La rappresentazione topografica del bacino sfrutta le caratteristiche della struttura TIN, utilizzando una risoluzione multipla che offre un’elevata flessibilità computazionale e che permette di riprodurre la risposta idrologica dei bacini ad alta risoluzione sia temporale (oraria) che spaziale (10-100m). Tale modello viene utilizzato in fase operativa per derivare la risposta idrologica del bacino ai prefissati scenari climatici e di uso del suolo.

## 2.3 Caso studio

Il bacino selezionato per l’applicazione, *Baron Fork at Eldon* (OK, USA), è caratterizzato da un’area di circa 800 km<sup>2</sup>, una quota media di 346 m.s.l.m e presenta al suo interno il sottobacino *Peacheater Creek at Christie*, che si estende su un’area di 64 km<sup>2</sup> con una quota media di 328 m.s.l.m. Si tratta del bacino su cui è stato originariamente testato il tRIBS, per il quale sono disponibili osservazioni idro-climatiche storiche e per il quale quindi il modello è stato già calibrato e validato, dimostrando un’elevata capacità di riprodurre la risposta idrologica osservata. Per ciascuno scenario considerato viene derivata, mediante il tRIBS, la corrispondente serie dei deflussi a scala oraria, sia alla sezione di chiusura dell’intero bacino che del sottobacino. La topografia dell’area viene derivata da un DEM a 30 m dell’USGS, mentre per rappresentare la distribuzione spaziale di uso del suolo e copertura vegetale attuale vengono utilizzati dati di *Land Use and Land Cover* dell’USGS, combinando varie classi vegetazionali e di uso del suolo al fine di distinguere tre macroclassi all’interno del bacino (zone con vegetazione, zone senza vegetazione e zone urbanizzate) che rappresentano anche un surrogato di classificazione dei suoli dal punto di vista delle proprietà idrauliche coinvolte nella modellazione idrologica (Ivanov et al., 2004).

## 2.4 Scenari sintetici analizzati

Ogni scenario sintetico considerato è costituito da uno scenario climatico (serie orarie relative ad alcune variabili climatiche) e da uno scenario di urbanizzazione (mappe annuali di uso del suolo). Tali scenari vengono generati considerando una condizione iniziale che, mediante l’applicazione di uno o più trend lineari, evolve verso una condizione finale prefissata per un orizzonte temporale di 100 anni. Vengono considerate quattro tipologie di scenari: scenario stazionario di confronto (*Baseline*), scenari con soli trend climatici (*C*); scenari con solo trend di urbanizzazione (*U*); scenari con trend sia climatici che di urbanizzazione (*CU*).

### 2.4.1 Scenari climatici

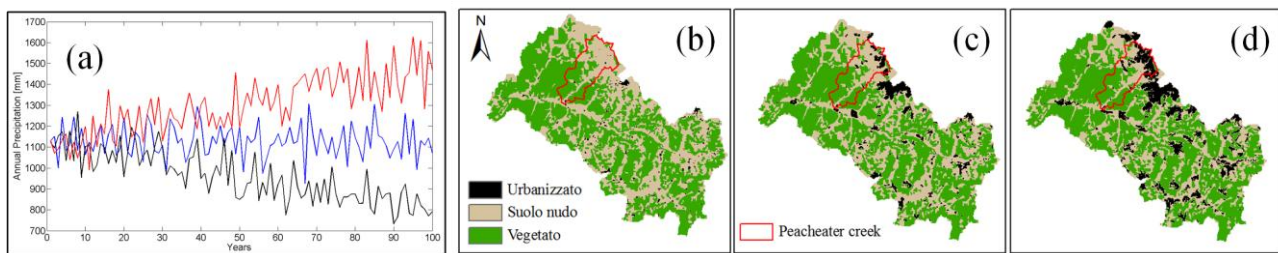
Gli scenari climatici vengono generati mediante un generatore climatico numerico avanzato, *Advanced*

*WEather GENerator* (AWE-GEN, *Fatichi et al.*, 2011), considerando due tipi di trend possibili, entrambi caratterizzati da un incremento lineare delle temperature: *negativo* ( $C_n$ ), prevede una riduzione lineare delle piogge medie annuali, e *positivo* ( $C_p$ ), prevede un incremento lineare delle piogge. Per valutare i trend climatici da applicare nel caso studio, si è fatto riferimento alle proiezioni climatiche meno conservative (RCP 8.5) per il periodo 2081-2100 relative all'ultimo rapporto dell'IPCC-5AR (*Intergovernmental Panel on Climate Change - fifth assessment report*; IPCC, 2013). In particolare, lo scenario  $C_n$  potrebbe essere considerato come rappresentativo della maggior parte delle regioni secche alle medie latitudini e dell'area sub-tropicale e considera un aumento delle temperature medie per un orizzonte temporale di 100 anni pari a +4°C e una riduzione delle piogge del -25%. Mentre, per lo scenario  $C_p$ , si considera lo stesso aumento delle temperature ed un aumento delle precipitazioni medie annue pari al +25%, consistentemente a quanto è previsto per alcune regioni alle alte latitudini, per la zona dell'Oceano Pacifico equatoriale e per molte regioni umide alle medie latitudini. Per creare i diversi scenari climatici, vengono inizialmente generate, mediante l'AWE-GEN e per una lunghezza complessiva di 100 anni, delle serie orarie stazionarie di pioggia, temperatura, radiazione solare, umidità relativa e velocità del vento, necessarie all'applicazione del tRIBS; nel parametrizzare il simulatore climatico vengono considerati gli statistici derivanti dalle osservazioni meteo-climatiche nel bacino, ottenendo quindi serie sintetiche statisticamente consistenti con le serie storiche osservate. In tal modo viene quindi creato uno scenario stazionario in termini di forzanti climatiche che viene utilizzato come scenario climatico per il *Baseline*. Sempre mediante l'AWE-GEN e applicando i trend lineari relativi prefissati (+4°C per le temperature medie,  $\pm 25\%$  per la precipitazione media annua in 100 anni), vengono successivamente generati gli scenari climatici di transitorio  $C_n$  e  $C_p$ , sempre su base oraria e per una lunghezza di 100 anni. Un esempio di applicazione dei trend pluviometrici viene fornito in Figura 1a, generato con riferimento a osservazioni reali (2007-2013) nel *Baron Fork*.

#### 2.4.2 Scenari di urbanizzazione

Il fenomeno di impermeabilizzazione dei bacini risulta altamente variabile a livello globale, a seconda della disponibilità e "appetibilità" socio-economica di aree di terreno potenzialmente urbanizzabili. Secondo un recente rapporto (AEA, 2006) la superficie delle aree urbane nell'UE è aumentata mediamente del 78% negli ultimi 50 anni. Tali dati sono confermati anche da *Prokop et al.* (2011) che, mediante il confronto fra carte dell'uso del suolo (*Corine Land Cover*) relative ad anni diversi, hanno stimato un aumento percentuale delle aree urbane nell'UE di circa il 9% fra il 1990 ed il 2006. In aree poco urbanizzate ed a forte espansione urbanistica, come quelle africane, sono stati riscontrati incrementi percentuali ben superiori; ad esempio, *Gumindoga et al.* (2014) hanno riscontrato un incremento di più del 600% in soli 20 anni per le aree urbane di un bacino dello Zimbabwe. In questo studio vengono considerati due ipotetici scenari dinamici di cambiamento del grado di urbanizzazione del suolo ( $U_1$  e  $U_2$ ), prevedendo esclusivamente un incremento della frazione impermeabile del bacino; in particolare, vengono considerati due diversi livelli di urbanizzazione: nello scenario  $U_1$  si considera un trend lineare di urbanizzazione associabile a molte delle zone europee, secondo cui, a partire dalla condizione iniziale di riferimento, la frazione di aree urbane risulti aumentata del 300% dopo 100 anni; nello scenario  $U_2$ , viene invece considerato un fattore di crescita doppio, ovvero un incremento percentuale delle aree urbane pari al 600% in 100 anni, associabile a zone a forte espansione urbanistica.

La configurazione *Baseline* considera uno scenario di urbanizzazione stazionario, con mappe di uso del suolo invariante nel tempo e corrispondenti a quella attuale, osservata nel bacino (Figura 1b). Tale mappa viene inoltre usata come scenario iniziale per ricavare gli scenari dinamici di urbanizzazione  $U_1$  e  $U_2$  (di cui vengono riportati degli esempi in Figura 1c e 1d, rispettivamente). Quest'ultimi vengono generati mediante un modello appositamente implementato, che associa ad ogni cella del bacino potenzialmente "occupabile" una probabilità di essere urbanizzata, in funzione della pendenza della cella, della contiguità o meno con celle già urbanizzate, e del grado di urbanizzazione nell'area in prossimità della cella. Fissato il tasso annuale di urbanizzazione, il modello sostituisce le celle con maggiore probabilità con celle impermeabili (urbane), generando un pattern spaziale di uso del suolo all'anno. Tali mappe dinamiche vengono rese disponibili al tRIBS, che è dotato di un modulo automatico per l'aggiornamento annuale delle mappe di uso del suolo e che considera ogni mappa costante fino al successivo aggiornamento.



**Figura 1.** (a) Ipotetici scenari di pioggia generati: piogge medie annue per lo scenario stazionario (in blu), per  $C_n$  (in nero) e per  $C_p$  (in rosso). Mappe di Uso del Suolo del Baron Fork: *Baseline*: scenario costante e corrispondente a quello attuale (b); ipotetica mappa finale di uso del suolo per lo scenario  $U_1$  (c) e per lo scenario  $U_2$  (d) considerando un incremento percentuale delle aree urbane del +300% e +600%, rispettivamente.

### 3 RISULTATI PRELIMINARI E CONCLUSIONI

Uno degli obiettivi del lavoro è quello di individuare appropriati indicatori idrologici, atti a rilevare e quantificare eventuali cambiamenti idrologici indotti da pressioni naturali e/o antropiche. A tal fine l'analisi dei trend viene effettuata per nove diversi scenari sintetici (*Baseline*,  $C_p$ ,  $C_n$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $C_pU_1$ ,  $C_pU_2$ ,  $C_nU_1$  e  $C_nU_2$ ) e su tre classi di indicatori. La prima, legata al regime idrologico, include il deflusso medio annuo, le componenti stagionali, la curva di durata, alcuni quantili caratteristici di portata, ed i coefficienti di deflusso mensili ed annuo. La seconda classe è legata alle portate estreme ed include un'analisi sulle portate massime annuali a diverse scale di aggregazione (valori e data di occorrenza) e sulle portate oltre una certa soglia critica. Un'ultima classe riguarda l'analisi delle portate ordinarie o basse, e considera come indicatori le portate minime annuali a diverse scale di aggregazione (valori e data di occorrenza), le portate sotto una certa soglia critica e la frequenza di deflussi nulli. La presenza del sottobacino risulta particolarmente utile per studiare gli effetti di scala; mediante il confronto fra i risultati ottenuti nel bacino principale e nel sottobacino, è infatti possibile quantificare in che modo i cambiamenti idrologici siano influenzati dalla scala dell'area in esame. Sebbene l'applicazione del framework sia ancora in via di sviluppo a causa dei tempi computazionali piuttosto elevati, i risultati preliminari, qui non mostrati, sembrano confermare una buona capacità della metodologia nell'identificare, quantificare e distinguere l'eventuale presenza di cambiamenti climatici e di uso del suolo, suggerendo specifici indicatori idrologici per ciascuna tipologia di trend.

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AEA, 2006. La dispersione urbana in Europa: una sfida ambientale ignorata. Relazione dell'Agenzia europea dell'ambiente 10/2006.
- AEA, 2010. L'ambiente in Europa – Stato e prospettive nel 2010: suolo. Agenzia europea per l'ambiente, Copenhagen
- Bras, R.L., Tucker G.E. & Teles V. Six Myths About Mathematical Modeling in Geomorphology. *Prediction in Geomorphology*, pp. 63-79: American Geophysical Union. 2003
- Caracciolo, D., Arnone, E. & Noto, L.V. Influence of spatial precipitation sampling on hydrological response at the catchment scale. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19 (3), 544-553, 2014
- Ceola, S., Montanari, A., & Koutsoyannis D. Toward a theoretical framework for integrated modeling of hydrological change. *Water*, 10.1002/wat2.1038, 2014.
- Faticchi, S., Ivanov, V.Y. & Caporali, E. Simulation of future climate scenarios with a weather generator. *AWR*, 34 (4), 448-467, 2011
- Gumindoga, W., Rientjes, T., Shekede, M.D., Rwasoka, D.T., Nhapi, I. & Haile, A.T. Hydrological Impacts of Urbanization of Two Catchments in Harare, Zimbabwe, *Remote Sens.*, (6), 12544-12574, 2014
- IPCC. Climate change 2013. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013
- Ivanov, V.Y., Vivoni, E.R., Bras, R.L. & Entekhabi, D. Preserving high-resolution surface and rainfall data in operational-scale basin hydrology: a fully-distributed physically-based approach. *Journal of Hydrology*, (298), 80-111, 2004
- Liuzzo L., Noto L., Vivoni E. & La Loggia G. Basin-Scale Water Resources Assessment in Oklahoma under Synthetic Climate Change Scenarios Using a Fully Distributed Hydrologic Model, *Journal of Hydrologic Engineering* (15), 107-122, 2009
- Miller, J. D., Hyeonjun K., Thomas R. K, Packman, J, Grebby S. & Dearden R. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover, *Journal of Hydrology* (515), 59-70, 2014
- Noto L., Ivanov V., Bras R. & Vivoni E. Effects of initialization on response of a fully-distributed hydrologic model, *Journal of Hydrology* (352), 107-125, 2008
- Prokop, G., Jobstmann, H. & Schonbauer, A. Overview on best practices for limiting soil sealing and mitigating its effects in EU-27 (Environment Agency Austria), Technical Report - 2011-50, ISBN: 978-92-79-20669-6, 2011