



Pasquale Versace

Processi idrologici e atmosferici

*Relazione generale
XXIX Convegno di Idraulica
e Costruzioni Idrauliche
Trento 7-10 settembre 2004*



CAMILAB
Laboratorio di Cartografia Ambientale e Modellistica Idrogeologica

Università della Calabria - Dipartimento Difesa del Suolo "V. Marone"
Direttore: Prof. Ing. Pasquale Versace

Centro di Competenza del Dipartimento di Protezione Civile
(Decreto del 26/01/2005 emanato ai sensi della Direttiva del 25/02/2004)



Quaderni del Camilab

pubblicazione periodica a cura del

Laboratorio di Cartografia Ambientale e Modellistica Idrogeologica

Università della Calabria - Dipartimento Difesa del Suolo "V. Marone"

Direttore: Prof. ing. Pasquale Versace

Centro di Competenza del Dipartimento di Protezione Civile

(Decreto del 26.01.2005 emanato ai sensi della Direttiva del 25.02.2004)

87036 Arcavacata di Rende (CS) - Ponte P. Bucci cubo 41/B

Tel. 0984 496 621/592/617 Fax 0984 496619

www.camilab.unical.it camilab@libero.it

Anno **1** numero **1**
giugno 2006

responsabile scientifico:
Prof. ing. Pasquale Versace

progetto grafico:
Luciano Marini

editing:
Francesco Cruscomagno

Pasquale Versace

**PROCESSI IDROLOGICI
E ATMOSFERICI**

**Relazione generale
XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche
Trento 7-10 settembre 2004**

**Laboratorio di Cartografia Ambientale e Modellistica Idrogeologica
Università della Calabria - Dipartimento Difesa del Suolo "V. Marone"**

Stampa: Agosto 2006
a cura della **Nuova Editoriale Bios**
Via Rendano, 25 - 87040 Castrolibero (CS)
Tel. 0984854149 - Fax 0984854038
E-mail: info@edibios.it - www.edibios.it

PROCESSI IDROLOGICI E ATMOSFERICI

Pasquale Versace¹

¹*Dipartimento di Difesa del Suolo "V. Marone", Università della Calabria*

Ringraziamenti

I motivi di soddisfazione che nascono dall'invito a sviluppare una relazione generale in occasione di un Convegno sono in questo caso arricchiti da specifiche considerazioni.

La prima è legata alla sede in cui si svolge il nostro 29° Convegno, perché Trento in pochi anni è riuscita a diventare una delle sedi di Idraulica e Costruzioni Idrauliche di maggior prestigio. La perfetta organizzazione del Convegno ne è un'ulteriore, significativa conferma.

La seconda discende dalla constatazione che i nostri incontri biennali hanno acquistato nel tempo un rilievo sempre crescente nel panorama delle iniziative scientifiche, diventando il luogo nel quale confrontare e discutere i temi nuovi e i risultati delle ricerche che si vanno sviluppando. Da qualche anno ormai tutte le ricerche di qualche rilievo che si svolgono nei nostri settori disciplinari sono presenti nei Convegni di Idraulica.

La grande crescita dell'Idrologia italiana

Motivo di soddisfazione è anche il tema della relazione, perché all'interno di una comunità scientifica, come la nostra, in piena salute e in costante espansione, l'Idrologia ha raggiunto una posizione di primo piano, passando da un ruolo sostanzialmente marginale ad uno sempre più incisivo e trainante.

Negli anni 50 le scuole di Idrologia in Italia si contavano sulle dita di una mano: Napoli, Padova, Milano e poche altre. Le stelle polari: Dino Tonini e Carlo Viparelli. Contributi importanti da parte di

altri scienziati, anche se solo marginalmente interessati ai temi dell'Idrologia: Evangelisti, Supino, De Marchi.

Nel corso degli anni con lo sviluppo del sistema universitario nazionale, con la nascita di tante nuove Università, le scuole di Idrologia si sono moltiplicate. Sono almeno 36 le sedi universitarie in cui c'è una presenza significativa della ricerca idrologica, con contributi certamente diversi sotto il profilo della qualità, ma in ogni caso degni di considerazione.

Alla crescita del settore hanno dato un contributo decisivo i gruppi organizzati che attraverso l'investimento di rilevanti risorse hanno favorito dagli anni 70 in poi la crescita impetuosa del settore. Nel periodo che va dal 1973 al 1982, nell'ambito del Progetto Finalizzato del CNR Conservazione del suolo, Enrico Marchi, coordinando il settore Dinamica Fluviale, ha aperto con straordinaria lungimiranza ampi spazi agli argomenti dell'Idrologia, ha promosso e incoraggiato la realizzazione di bacini sperimentali e attrezzati, e ha favorito la stretta integrazione tra ricercatori di discipline e sedi diverse. A partire dal 1985, sotto l'intelligente guida di Lucio Ubertini e con il supporto finanziario della Protezione Civile, il Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, comunemente noto con l'acronimo GNDCI, ha favorito per circa 20 anni, la crescita della ricerca idrologica in un quadro interdisciplinare, complesso e razionale, consentendo al nostro Paese di porsi all'avanguardia negli studi sull'analisi e sulla mitigazione del rischio idrogeologico, ed in particolare nelle ricerche in campo idrologico (Figura 1).



Figura 1. Copertine di alcuni dei lavori realizzati dal Progetto Finalizzato “Conservazione del Suolo” e dal “Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche” (GNDCI).

Ma ci sono altri indicatori che testimoniano la grande crescita dell’Idrologia italiana. Un dato essenziale è quello dei dottori di ricerca. Gli argomenti sviluppati nelle tesi danno indicazioni importanti sui temi di frontiera che la comunità scientifica intende sviluppare e costituiscono il principale strumento di espansione dei temi

scientifici affrontati dalle diverse scuole. Le tesi di dottorato ci dicono dove va la ricerca. A partire dal primo ciclo con le tesi del 1989 di Armando Brath e Paolo Burlando il numero delle dissertazioni sui temi di Idrologia è salito con continuità superando alla fine del XIV ciclo le 100 unità (Figura 2).

TESI DI DOTTORATO
dal 1° al 14° ciclo

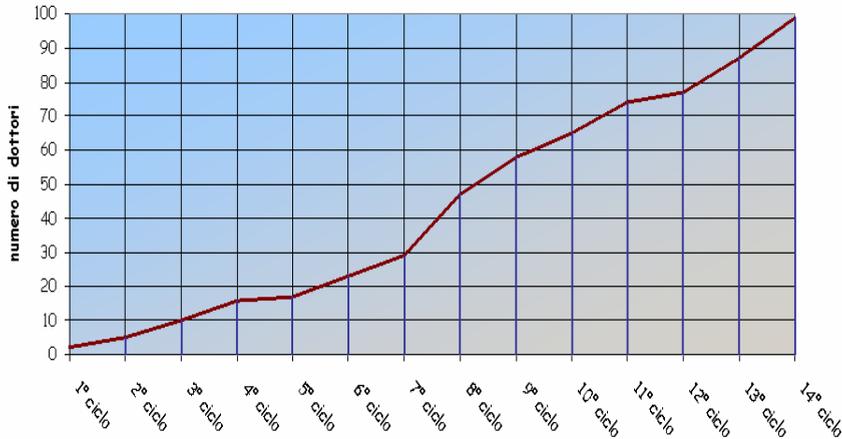


Figura 2. Numero di dottori di ricerca per ciclo di dottorato con dissertazioni su temi di Idrologia (dati cumulati).

Altro indicatore è la presenza sulle più prestigiose riviste internazionali. Se si considerano gli articoli apparsi su *Water Resources Research* e *Journal of Hydrology*, emerge il ruolo crescente della comunità idrologica italiana.

Considerando come anni di riferimento il 1985 e il 1990 si nota che complessivamente sulle due riviste sono apparsi in ciascuno di questi due anni non più di due o tre articoli di autori italiani. Nel periodo successivo la tendenza è cambiata e gli autori italiani sono stati sempre più presenti con articoli spesso di grande impatto. Dal 1991 al 2004 si contano, infatti, 247 articoli, quasi 18 l'anno, anche se non tutti strettamente idrologici (Figure 3a, 3b e Appendice). Un risultato da

migliorare, ma che appare confortante se si paragona con i dati del passato.

Considerando la stessa finestra temporale è anche interessante seguire l'andamento del numero di memorie di Idrologia ai nostri Convegni di Idraulica, a partire da Cosenza 1990 fino a Trento 2004. Come si vede è un numero che tende a crescere verso i 100 articoli. In termini percentuali le memorie di Idrologia si mantengono sempre intorno al 18-20% del totale, ad ulteriore conferma della rilevanza che questo settore ha ormai acquisito nell'ambito della Comunità idraulica nazionale. E forse non è lontano il tempo in cui il nostro diventerà il Convegno di Idraulica Costruzioni Idrauliche e Idrologia (Figura 4).

Water Resources Research

- Aprile 1991
Geomorphological dispersion
Rinaldo, Marani, Rigon
- Agosto 1993
Conceptual-stochastic modeling of seasonal runoff using autoregressive moving average models and different scales of aggregation
Claps, Rossi, Vitale
- Agosto 1993
Adaptive calibration of a conceptual model for flash flood forecasting
Brath, Rosso
- Luglio 1996
Local contributions to infiltration excess runoff for a conceptual catchment scale model
Orlandini, Mancini, Paniconi, Rosso
- Dicembre 1996
On transport in porous formations characterized by heterogeneity of evolving scales
Bellin, Pannone, Fiori, Rinaldo
- Maggio 1998
Solute transport in highly heterogeneous aquifers
Salandin, Fiorotto
- Maggio 1999
A conceptual model for infiltration and redistribution in crusted soil
Smith, Corradini, Melone
- Giugno 1999
Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall
Deidda, Benzi, Siccardi
- Ottobre 1999
Estimation of surface heat flux and an index of soil moisture using adjoint-state surface energy balance
Castelli, Entekhabi, Caporali
- Novembre 1999
Determining soil hydraulic functions from evaporation experiments by a parameter estimation approach: Experimental verifications and numerical studies
Romano, Santini
- Agosto 2000
Preferential states of seasonal soil moisture: the impact of climate fluctuations
Rodriguez-Iturbe, Porporato, D'Oroico, Ridolfi
- Marzo 2001
New insights about the climatic and geologic control on the probability distribution of floods
Fiorentino, Iacobellis
- Maggio 2001
On the cumulative area distribution of natural drainage basins along a coastal boundary
La Barbera, Lanza
- Settembre 2001
On non-Newtonian fluid flow in rough fractures
Di Federico
- Gennaio 2004
A stochastic approach for assessing the uncertainty for rainfall-runoff simulations
Montanari, Brath

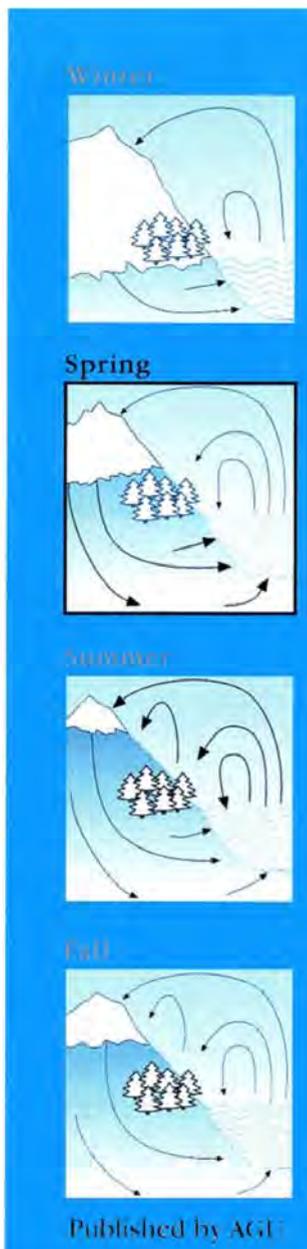


Figura 3a. Nel periodo tra il 1991 e il 2004 sono stati pubblicati sulla rivista *Water Resources Research* oltre 160 articoli di autori italiani, invertendo in modo significativo una tendenza che aveva visto fino ad allora una presenza molto modesta su questa rivista prestigiosa.



Figura 3b. Discorso analogo può essere fatto per la rivista *Journal of Hydrology*. Dal 1991 al 2004 gli articoli di autori italiani sono stati circa 85.



Figura 4. Andamento del numero di memorie di carattere idrologico presentate ai Convegni di Idraulica e Costruzioni Idrauliche tra il 1990 ed il 2004.

Dai titoli delle tesi di dottorato, dagli articoli su WRR e JH, dalle memorie ai Convegni di Idraulica emerge un profondo cambiamento nei temi affrontati. L'interesse appare sempre più rivolto alla comprensione, alla misura e alla modellazione dei fenomeni idrologici di base. La modellazione matematica dei processi idrologici si affianca e prende il sopravvento sull'approccio statistico e sulla modellazione stocastica che per lunghi anni l'hanno fatta da padroni. Si aprono nuovi orizzonti su discipline di settori affini: la meteorologia, l'ecologia, la stabilità dei versanti.

L'Idrologia italiana è capace di rinnovarsi, di aggiornare gli obiettivi della ricerca, senza dimenticare le proprie radici, restando saldamente ancorata al mondo dell'Idraulica, di cui è anzi diventato uno dei settori trainanti, come appare evidente anche dal cambio di denominazione del Settore Scientifico Disciplinare.

Sui contenuti della relazione

In questa relazione si cercherà di capire qual è il senso di questi cambiamenti, quali sono gli obiettivi a portata di mano e quelli appena delineati che occorre mettere a fuoco, quali tra i cento sentieri che ci stanno davanti appaiono i più promettenti.

Per far questo si userà un tono discorsivo e un livello di approfondimento limitato all'essenziale, per cercare di interessare i non idrologi, ma correndo il rischio di risultare banale per i tanti idrologi presenti in questa sala. Ma credo sia questo il taglio da dare ad una relazione generale.

Gli argomenti che saranno trattati riguardano principalmente la modellazione afflussi deflussi. Si discuterà sull'astratto tema del modello perfetto, si descriveranno in modo schematico le caratteristiche di tali modelli, si porrà l'accento sui nodi, non sempre e non da tutti adeguatamente considerati, della validazione dei modelli e dell'incertezza della stima. Un cenno breve sarà,

infine, indirizzato a problemi, per ora ancora marginali, ma credo meritevoli di maggiore sviluppo: il rapporto tra idrologia e stabilità dei versanti, e la previsione idrologica delle precipitazioni future.

La missione dell'idrologo: il modello perfetto

La questione che abbiamo a lungo dibattuto se l'idrologia debba essere intesa dalla nostra comunità come una Scienza o solo come una Tecnica ormai appartiene al passato. L'idrologia si è affermata come Scienza ed è stata riconosciuta ovunque come tale.

Il compito dell'idrologia è semplice e affascinante: studiare il ciclo dell'acqua sulla terra per contribuire alla definizione delle politiche di intervento necessarie:

- a soddisfare i fabbisogni di acqua per la vita, per la salute, per lo sviluppo,
- a prevenire la distruzione degli ecosistemi,
- a ridurre gli effetti dei disastri naturali.

Problemi di straordinaria rilevanza che si aggravano nel tempo con la diminuzione quantitativa e qualitativa della risorsa acqua, l'aumento esponenziale del territorio antropizzato da sviluppare, risanare, difendere dai fenomeni naturali. La forbice tra bisogni e disponibilità si amplia sempre di più.

L'idrologo deve fornire gli strumenti predittivi necessari per decidere la gestione delle risorse idriche, la tutela della loro qualità, gli interventi di mitigazione del rischio. Deve perciò capire e conoscere i fenomeni nel maggior dettaglio possibile. Deve saperli descrivere con la maggiore precisione possibile. Deve essere in grado di riprodurre e simulare i fenomeni che si sviluppano a scala di versante e a scala di bacino sia quelli naturali sia quelli condizionati o comunque influenzati dall'azione dell'uomo.

In una parola l'idrologo deve costruire il "modello perfetto".

Si tratta di un'affermazione radicale e massimalista, ma utile a semplificare la questione e a ricondurla ad uno schema manicheo, che, contrapponendo in modo estremo due posizioni alternative, consente di cogliere più agevolmente l'essenza della questione.

Si tratta, in effetti, di una questione antica da sempre dibattuta e che riguarda la capacità dell'uomo di riprodurre con i suoi modelli la

realtà, l'utilità di una simile impresa, la strada da seguire se si decide di provare

Verso la realizzazione del modello perfetto

Nel caso dell'idrologia l'obiettivo è realizzare un modello fisicamente basato che non solo sia coerente con l'osservazione sperimentale, ma fornisca anche una descrizione accurata e completa del comportamento idrologico del sistema naturale, attraverso una rigorosa trattazione matematica dei vari processi con opportune equazioni differenziali, che descrivono il bilancio di massa, di quantità di moto e di energia, riproducendo la complessità del sistema analizzato. Il modello perfetto!

Si tratta è evidente di un obiettivo astratto, un punto di arrivo irraggiungibile ma è utile per fissare un obiettivo, un punto focale verso il quale tendere.

Nella tassonomia idrologica più diffusa e significativa basata sulla struttura del modello, i modelli fisicamente basati sono una delle tre classi principali. Le altre sono i modelli empirici e i modelli concettuali.

I modelli empirici trascurano la rappresentazione dei fenomeni fisici che intervengono nella formazione del deflusso, limitandosi ad identificare l'operatore matematico, o meglio la funzione di trasferimento, che meglio interpreta i legami che intercorrono tra l'ingresso e l'uscita del sistema. L'esempio classico è l'idrogramma unitario istantaneo nelle sue innumerevoli varianti (Dooge, 1959).

Nei modelli concettuali la risposta del bacino è determinata, invece, dall'interazione dei singoli fenomeni del ciclo idrologico, rappresentati attraverso elementi concettuali interconnessi. Il prototipo è il modello Stanford (Crawford e Linsley, 1966). I modelli Xinanjiang (Zhao, 1980), TOPMODEL (Beven e Kirby, 1979) e l'approccio adottato nei modelli semi-distribuiti basati su idrotipi o Hydrological Response Unit (HRU) (Maidment e Cai, 1996), sono alcune delle principali realizzazioni riconducibili a questa classe.

L'inizio della modellistica fisicamente basata si fa comunemente risalire alla fine degli anni '60 con la pubblicazione del lavoro di Freeze e Harlan (1969) in cui è stato proposto un *progetto* di un modello idrologico per la descrizione fisica e distribuita delle diverse componenti del ciclo dell'acqua. Il prototipo proposto consiste nell'integrazione numerica dei sistemi di

equazioni differenziali che descrivono il deflusso superficiale sui versanti e nei canali, il movimento dell'acqua sia nella zona non satura sia nella zona satura, considerando le soluzioni di un sistema come condizioni al contorno dell'altro. Questo lavoro pionieristico ha attratto molti seguaci; grazie anche alla disponibilità di mezzi di calcolo sempre più potenti, negli anni successivi sono apparsi un rilevante numero di modelli che, pur differenziandosi per unità di rappresentazione e tecniche di soluzione, possono essere ricondotti alla struttura generale del modello delineato da Freeze e Harlan. Esempi di modelli fisicamente basati e distribuiti sono il modello SHE (Système Hydrologique Européen) (Abbott et al. 1986), con le varianti SHETRAN e MIKESHE (Bathurst et al. 1995; Refsgaard e Storm, 1995), sviluppato da alcuni centri di ricerca europei; l'IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model) nel Regno Unito (Calver e Wood, 1995), il DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model) negli Stati Uniti (Wigmosta et al., 1994), il THALES (Grayson et al., 1992a) ed il TOPOG (Vertessy et al., 1993) in Australia, il TOPKAPI (TOPographic Kinematic Approximation and Integration) in Italia (Todini, 1995).

Quest'ultimo rappresenta un interessante tentativo di modello distribuito applicabile, a seconda della scala spaziale di interesse, anche in forma concentrata, e comunque in grado di conservare la medesima struttura di modellazione e valori realistici dei parametri adottati.

Un tentativo, recente e molto ambizioso, di riformulazione delle equazioni che governano la risposta idrologica di un bacino, tenendo conto esplicitamente ed in maniera formale della dipendenza dalla scala, è dovuto a Reggiani et al. (2000). Gli autori hanno derivato e risolto (per una scala temporale di lungo termine) le equazioni di bilancio della massa, dei momenti, dell'energia e dell'entropia, direttamente alla scala di

un'arbitraria unità di modellazione idrologica tridimensionale denominata REW (Representative Elementary Watershed). Ciascuna unità REW rappresenta una porzione di bacino drenante in un ramo del reticolo idrografico, e comprende la descrizione dei processi di moto nel saturo e nel non saturo, del deflusso superficiale sui versanti e nei canali. La complessa formulazione, tuttavia, necessita ancora di ulteriori sviluppi prima di trovare un'applicazione pratica diffusa.

Negli ultimi anni, inoltre, hanno preso avvio modelli idrologici distribuiti finalizzati all'analisi di particolari aspetti del ciclo idrologico, ovvero orientati alla formulazione di schemi SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer) rappresentativi delle interazioni tra biosfera e bassa atmosfera. Il crescente interesse nelle complesse e bidirezionali interazioni tra clima e suolo alla mesoscala, ha orientato parte della ricerca verso un tentativo d'integrazione tra modelli LSM (Land Surface Model), che considerano i processi nei primi strati di suolo, e modelli meteorologici di circolazione globale, GCM (Global Circulation Model). Lo scopo ultimo è quello di integrare nei modelli numerici di previsione meteorologica la conoscenza dei processi idrologici che avvengono nei primi strati di suolo. Resta comunque critico il problema della scala.

La Figura 5 schematizza un itinerario cronologico della realizzazione dei più significativi modelli riconducibili a tutti e tre i gruppi prima richiamati (empirici, concettuali, fisicamente basati). Sono anche indicate alcune delle condizioni che hanno fatto da cornice e hanno influenzato lo sviluppo dei vari modelli: l'approccio hortoniano e dunniano per la stima dell'infiltrazione, lo sviluppo degli strumenti di calcolo, dei GIS, delle tecniche di remote sensing.

La parte finale del grafo riporta anche gli acronimi dei principali modelli sviluppati in Italia negli ultimi anni e riconducibili in massima parte al gruppo dei modelli concettuali e in qualche caso a quello dei modelli fisicamente basati. Sono anche indicati i Land Surface Model che appaiono almeno in prospettiva quelli suscettibili di maggiore sviluppo.

La struttura dei modelli fisicamente basati

I modelli fisicamente basati hanno una struttura che pur differendo da modello a modello può essere ritenuta caratterizzante per l'intera tipologia. In particolare gli elementi strutturali più rilevanti sono la generazione dei deflussi alla scala di versante e il trasferimento dei deflussi così generati alla sezione di chiusura del bacino.

La generazione dei deflussi richiede la discretizzazione spaziale della superficie del bacino in elementi bidimensionali o

tridimensionali che rappresentano la cella elementare di riferimento. La Figura 6 rappresenta alcune delle tecniche adottate nei vari modelli per identificare tali celle.

In ogni cella elementare si effettua il bilancio idrologico e il bilancio energetico del suolo (Figura 7), considerando tutti i processi che si sviluppano per l'interazione delle precipitazioni con il terreno e con la copertura vegetale e per l'interazione tra celle limitrofe. Si possono in tal modo identificare le aliquote di afflusso che concorrono alla generazione dei deflussi superficiali e sub-superficiali.

I processi considerati, le equazioni utilizzate per descriverli, le semplificazioni e le schematizzazioni adottate differenziano i vari modelli, che quasi sempre finiscono per essere caratterizzati proprio dalle procedure utilizzate per la generazione dei deflussi.

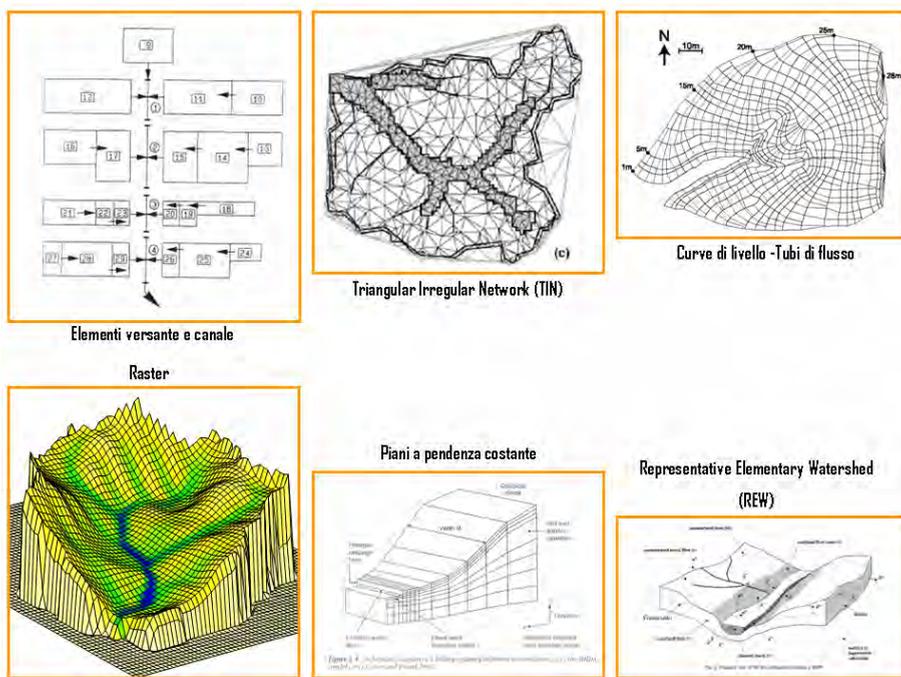


Figura 6. Alcune delle principali discretizzazioni spaziali del bacino idrografico alla base delle unità di modellazione idrologica considerate nella trasformazione afflussi-deflussi.

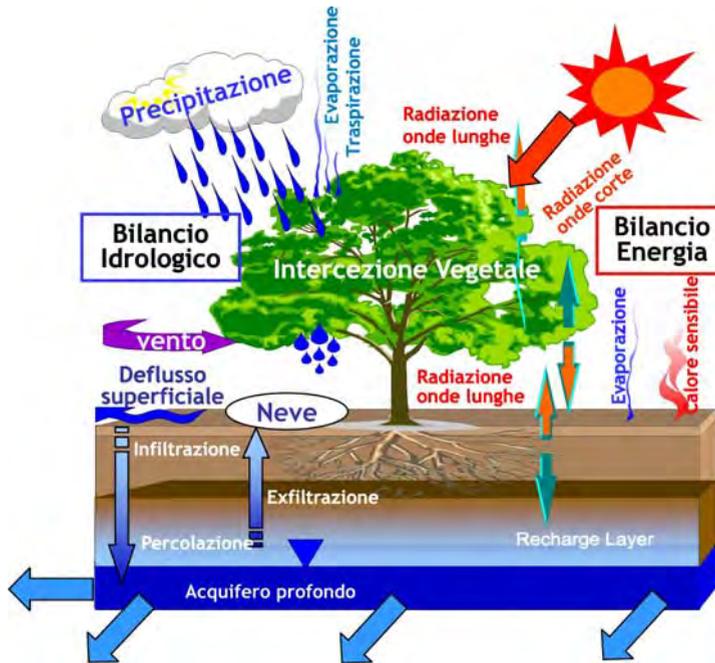


Figura 7. Schematizzazione dei principali processi coinvolti nel bilancio idrologico ed energetico della singola cella.

Il modello, in ogni caso, deve essere in grado di riprodurre i diversi meccanismi che consentono la formazione del deflusso superficiale, così come illustrato in Figura 8, adattata da Beven (2000). In particolare devono essere riprodotti: il meccanismo hortoniano (Horton, 1933) che ipotizza che il deflusso superficiale occorra quando l'intensità di precipitazione supera la capacità di infiltrazione del terreno, magari solo su una parte del versante (Betson, 1964); il

meccanismo dunniano (Dunne e Black, 1970; Dunne et al., 1975) che ipotizza il meccanismo di saturazione dal basso o per eccesso di saturazione, nel quale giocano un ruolo fondamentale gli scambi idrici laterali che avvengono nel suolo; il deflusso superficiale di ritorno, usualmente indicato come *return flow*, che si riscontra in aree di convergenza topografica o di minore trasmissività o in presenza di falde sospese.

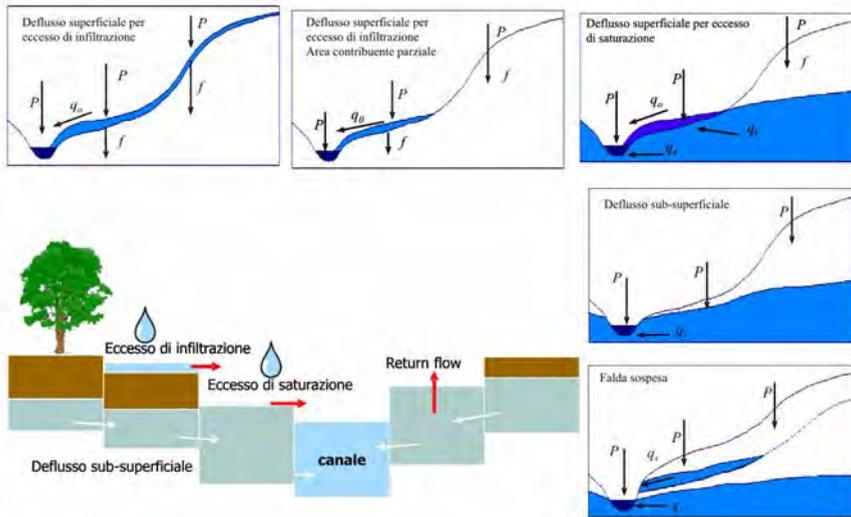


Figura 8. Possibili meccanismi di formazione del deflusso. P = precipitazione; q_o = deflusso superficiale; q_s = deflusso sub-superficiale; q_r = return flow; f = infiltrazione. Adattata da Beven (2000).

È importante tuttavia che sia rispettato il concetto di *area contribuyente variabile*, in base al quale il deflusso non si origina in tutto il bacino contemporaneamente, ma in una zona che si espande e si contrae, stagionalmente e nel corso dell'evento, in funzione dell'intensità di precipitazione, del contenuto d'acqua antecedente, della posizione della falda e delle caratteristiche del suolo.

La variabilità dell'area contribuyente è peraltro legata all'interazione tra infiltrazione e moto nel mezzo non saturo che a sua volta interagisce con il moto nel mezzo saturo. Tali interazioni devono essere adeguatamente modellate.

Altro elemento strutturale caratteristico dei modelli fisicamente basati è il trasferimento del deflusso superficiale e sotterraneo alla sezione di chiusura del bacino. Si utilizzano per il deflusso superficiale le equazioni del moto quasi sempre espresse in forma bidimensionale o monodimensionale. Per il deflusso sotterraneo si

utilizza nel mezzo saturo l'equazione di Boussinesq, anch'essa in forma mono o bidimensionale in relazione all'unità di modellazione adottata (versante o bacino).

A titolo illustrativo le Figure 9 e 10 riportano lo schema adottato dal già citato SHE, uno dei modelli fisicamente basati più diffusi e relativamente completi, e le equazioni da esso utilizzate per simulare i vari processi di base.

Considerate le limitazioni dei modelli concentrati, quale motivazione per lo sviluppo di un modello distribuito e fisicamente basato, Freeze e Harlan (1969) suggerirono che una migliore comprensione dei processi interni avrebbe potuto portare importanti benefici nella risoluzione dei problemi quali la previsione in bacini non strumentati e la valutazione degli effetti delle variazioni nell'uso del suolo sulle dinamiche interne del sistema.

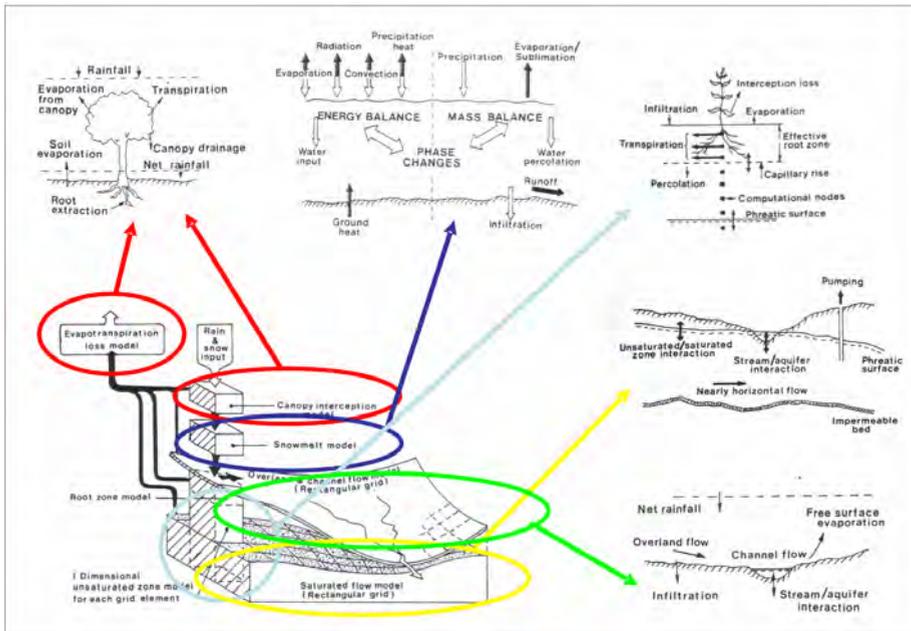


Figura 9. Dettaglio dei processi idrologici analizzati nel modello SHE (Système Hydrologique Européen).

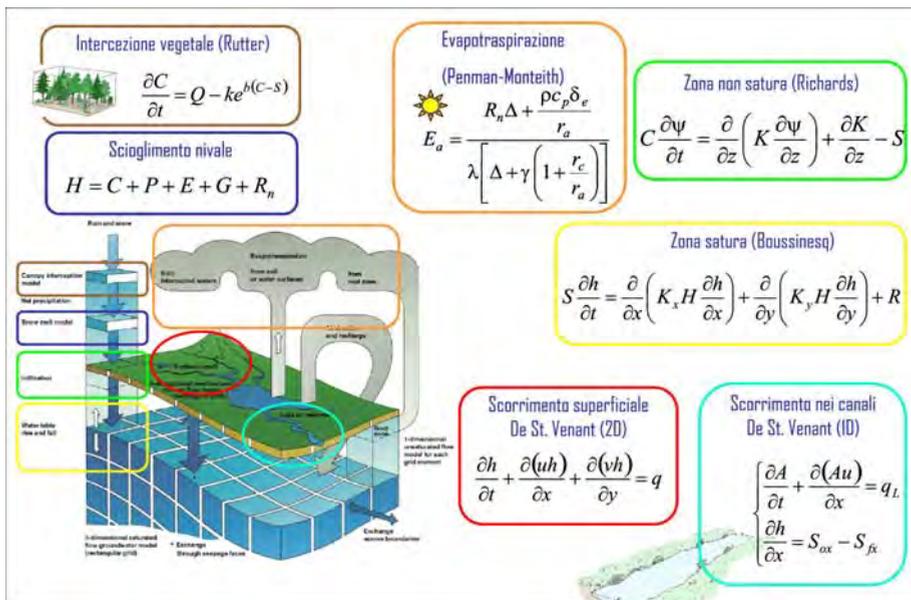


Figura 10. Modellazione matematica dei singoli fenomeni adottata nel modello SHE.

Opinioni a confronto

Lungo è il cammino percorso verso la costruzione di modelli fisicamente basati che in qualche misura possano aspirare al ruolo di modello perfetto. Ma i risultati sono ancora molto lontani dall'essere soddisfacenti.

In letteratura non mancano critiche, anche molto severe, verso i modelli fisicamente basati e discussioni serrate circa i vantaggi e gli svantaggi che una loro applicazione implica. Molti pongono l'accento sui rischi che può comportare l'applicazione acritica di questo tipo di modelli, soprattutto quando si confondono i risultati della simulazione con la realtà. Altri mettono in discussione addirittura la opportunità di perseguire l'obiettivo di costruire un modello perfetto. Articoli, famosi nel mondo idrologico, come quelli di Klemeš (1986a), Beven (1989, 1996, 2001, 2002), Grayson et al. (1992b), Woolhiser (1996), Refsgaard et al. (1996), Bronstert (1999), Sivapalan (2003) e tanti altri, affrontano in modo approfondito e appassionato la questione.

Gli elementi di scetticismo possono essere così delineati:

- La costruzione di un modello perfetto è inutile. Non ha alcuna coerenza con gli obiettivi dell'Idrologia. È sufficiente raggiungere un risultato affidabile per la risoluzione dei problemi specifici che si devono affrontare e un livello di approssimazione compatibile con il quadro delle incertezze derivanti dagli altri settori disciplinari eventualmente interessati ai medesimi problemi. Un inno all'Idrologia tecnica, e ai modelli a valenza limitata.
- Ci sono incongruenze di scala derivanti dal fatto che le equazioni su cui si basano i modelli sono state derivate per descrivere il comportamento fisico di sistemi omogenei a piccola scala, mentre le dimensioni utilizzate per discretizzare il territorio sono molto più grandi e non esenti da eterogeneità spaziale. La rappresentazione di tipo deterministico dei processi fisici che bene descrive quanto avviene in laboratorio, non può essere adeguata nel descrivere le dinamiche non lineari e non stazionarie che caratterizzano i bacini idrografici reali (Grayson et al., 1992b). Il significato fisico dei parametri in molti casi non viene preservato. Un esempio significativo (Beven, 2001) è rappresentato dalla descrizione del moto in un mezzo non

saturo basata sull'equazione di Richards, che non è sempre applicabile alla scala di celle nelle quali possono essere rilevanti le eterogeneità del suolo per la presenza di percorsi preferenziali (Beven e German, 1982). La Figura 11 esemplifica in modo evidente questa situazione.

- Più in generale poiché alla piccola scala i fenomeni idraulici sono dominati dalla geometria locale e dalle resistenze al moto locali che possono risultare anche molto eterogenei, il sistema naturale che si vuole modellare risulta, nella maggior parte dei casi, molto complesso e quindi difficile da caratterizzare con la sintesi necessaria per la gestione del sistema informativo.
- Il problema delle scale è strettamente connesso non solo alla rappresentazione matematica dei fenomeni, ma anche al problema delle misure. C'è, infatti, una notevole differenza tra la scala spaziale delle osservazioni e quella di calcolo, perché, ad eccezione della portata, la maggior parte delle misure forniscono informazioni a piccola scala, a livello quasi puntuale, comunque molto inferiore alla scala delle celle in cui il bacino è discretizzato. Inoltre, le osservazioni disponibili con le attuali tecniche di misura riguardano solo una piccola parte dei fenomeni idrologici. I processi che avvengono nel sottosuolo, ad esempio, sono ancora difficilmente misurabili. In ogni caso, anche se fosse possibile misurare in ogni loro aspetto i processi coinvolti, si avrebbe una visione pur sempre parziale di quanto avviene nel bacino: al massimo una fotografia dello stato attuale.
- Anche se molti modelli risultano in grado di fornire una simulazione efficace della risposta idrologica di un singolo bacino, questo non significa che essi riescano a rappresentarne il reale comportamento. La taratura resta, infatti, un passaggio obbligato, nel confronto tra variabili osservate e simulate, pur essendo i parametri grandezze, almeno teoricamente, misurabili in situ.

L'inadeguatezza dei modelli di simulazione e l'insufficienza delle misure finiscono per riflettersi sulla identificabilità dei parametri e del modello stesso. È possibile, infatti, che set diversi di parametri di un dato modello forniscano simulazioni accettabili dei dati sperimentali. Ed è anche possibile che modelli poco accurati nel

descrivere i fenomeni di base danno risultati non molto diversi da quelli ottenuti con modelli più evoluti e sofisticati. Beven e Binley (1992) utilizzano il termine equifinalità per descrivere questo aspetto della modellazione idrologica.

Pertanto, se è vero che modelli semplici possono dare risultati comparabili con i modelli più complessi, non risulta possibile apprezzare i miglioramenti conseguiti con nuovi modelli o con nuove versioni di modelli.

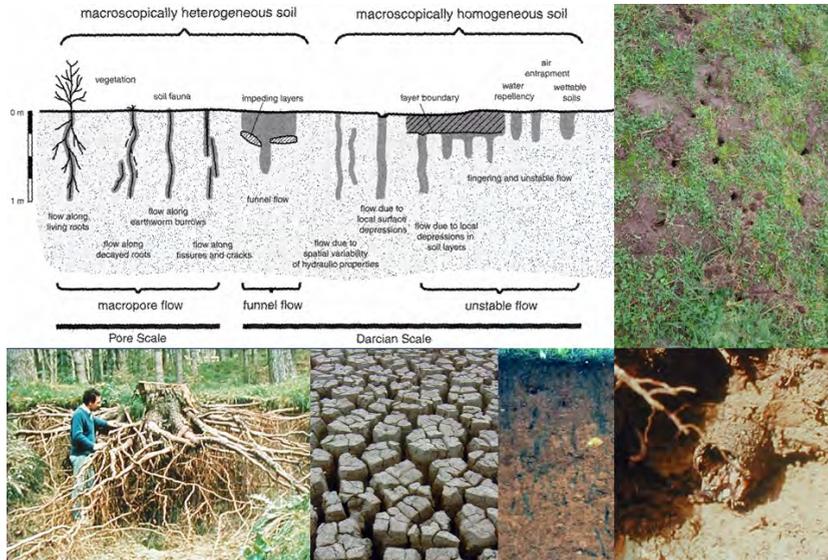


Figura 11. Eterogeneità dei suoli e percorsi preferenziali (Hendrickx e Flury, 2001).

Ma ci sono ragioni che al contrario suggeriscono di seguire la strada dello sviluppo dei modelli fisicamente basati, cercando la chimera del modello perfetto. Vediamone alcune.

- La volontà di capire sempre meglio i fenomeni del ciclo idrologico e la loro dinamica. E quindi la costruzione di modelli il cui obiettivo non è limitato all'applicazione, ma punta anche alla conoscenza e alla verifica delle ipotesi formulate.
- I modelli distribuiti e fisicamente basati permettono di effettuare previsioni in bacini non strumentati, di cogliere, cioè, gli effetti della eterogeneità spaziale a larga o larghissima scala legata alle diverse caratteristiche dei bacini. La descrizione sintetica dei modelli concentrati, e il debole legame tra la schematizzazione matematica del fenomeno e la realtà fisica che essi dovrebbero modellare, non consentono di trasferire ad altri bacini i risultati ottenuti in una specifica applicazione.
- I modelli fisicamente basati sono in grado di riprodurre la non stazionarietà, simulando gli effetti indotti sulla risposta idrologica da variazioni nella destinazione di uso del suolo, da cambiamenti di natura antropica e/o climatica, da fenomeni estremi come una grande alluvione o un lungo periodo siccitoso, da altri eventi particolari (incendi boschivi, collasso dei versanti).
- I modelli distribuiti sono in grado di riprodurre la variabilità spaziale delle grandezze idrologiche. La conoscenza di tale variabilità è di interesse anche in molti problemi applicativi. È il caso, ad esempio, della posizione della falda e dello stato di umidità del suolo.
- La carenza di dati sperimentali e di misure dirette è un problema che è destinato nel tempo ad attenuarsi, grazie soprattutto alle misure da remote sensing che assicurano informazioni su diversi parametri idrologici su aree estese e con una frequenza temporale paragonabile alla scala di evento. Il carico computazionale che

deriva dall'incremento di dati appare già ora poco rilevante e lo sarà sempre più nel futuro.

Anche queste argomentazioni appaiono valide e bilanciano ampiamente le ragioni contrarie. Ma l'argomento che sembra far pendere la bilancia in favore dei modelli fisicamente basati, e in prospettiva del modello perfetto, è certamente il desiderio di conoscere e di capire, la volontà di spostare passo dopo passo i limiti della conoscenza. E anche se l'obiettivo da conseguire è astratto e utopico esso appare, magari proprio per la sua evanescenza, straordinariamente attraente, ed in grado di rischiarare il cammino da percorrere.

Può aiutare in questo senso superare la classificazione tra modelli elementari di tipo empirico e/o concettuale a parametri concentrati e modelli complessi spazialmente distribuiti e fisicamente basati. Allocuzione, questa ultima, tutto sommato poco discriminante dal momento che tutti i modelli cercano di descrivere, anche se in modo grossolano e approssimato, i fenomeni fisici che si sviluppano alla scala di versante e di bacino, mentre nessun modello è in grado di rappresentare in modo completo ed esauriente la realtà rappresentata dal sistema naturale. Già Woolhiser (1996), aveva proposto di superare questo tipo di classificazioni e di limitarsi, più realisticamente, a distinguere soltanto tra modelli a complessità crescente, disposti in un percorso lungo il quale si avanza man mano che migliorano le conoscenze dei fenomeni idrologici di base, si incrementano le osservazioni sperimentali, si sottopongono a validazione i modelli già realizzati. Passo dopo passo si costruiscono modelli sempre più evoluti ed affidabili nella simulazione del ciclo idrologico. Un cammino molto lungo, ma che deve essere percorso.

La validazione dei modelli idrologici

L'abbondanza dei modelli proposti in letteratura rende necessari criteri oggettivi e ben codificati per valutare le prestazioni di un modello in relazione a specifiche esigenze applicative. In assenza di una procedura standardizzata ed universalmente riconosciuta, i risultati ottenuti finiscono, infatti, per essere giudicati solo con criteri soggettivi, con procedure disomogenee che spesso sono tese solo a mettere in luce gli aspetti positivi della modellistica adottata o proposta. La validazione in senso assoluto di un modello, tuttavia, non appare conseguibile, perché essa a rigore potrebbe riguardare solo un modello "perfetto", e non è, quindi, applicabile a modelli fisicamente basati che tendono a tale

obiettivo, ma sono ben lontani dall'averlo raggiunto.

La validazione, d'accordo con Kirchner et al. (1996), appare quindi al tempo stesso indispensabile ed impossibile.

Si tratta ovviamente di un paradosso legato al concetto di validazione assoluta del modello.

Più realisticamente la validazione rappresenta l'ultimo passo del processo di costruzione di un modello, ed è necessaria per valutarne le prestazioni, e per trarre, dai risultati conseguiti, spunti utili a favorire la progressiva evoluzione della modellistica.

Il termine validazione non è da tutti condiviso. Molto spesso si preferiscono altre locuzioni: verifica, valutazione, conferma, test, ecc.

Si ritiene, infatti, che la validazione possa riguardare solo una teoria che, fino a prova contraria, è vera ed è confermata dalle sperimentazioni e dalle osservazioni; e non può, pertanto, riguardare un modello, che costituisce solo una schematizzazione, magari molto accurata, ma comunque incompleta, della realtà.

L'utilizzo del termine validazione, inoltre, appare a taluni improprio perché può indurre ad una falsa aspettativa riguardo ai risultati forniti dal modello.

L'abbondanza lessicale sembra però derivare soprattutto dal fatto che spesso i vari termini sono riferiti ad analisi e procedure diverse, con finalità che possono essere anch'esse diverse, quali ad esempio: verificare la correttezza del codice di calcolo, degli schemi numerici e delle equazioni analitiche adottate o valutare la capacità del modello di fornire previsioni accurate anche in periodi non considerati nella taratura o valutare la corretta rappresentazione della realtà. La validazione è anche considerata come una procedura di rifiuto del modello sulla base della scarsa capacità di riprodurre i dati osservati. È un'impostazione analoga a quella utilizzata nei test sulle ipotesi statistiche, che tende a sottolineare la possibilità di validare un modello solo per una specifica applicazione ad un particolare bacino e sulla base dei dati disponibili, e non in linea teorica e generale.

Per i dettagli si rimanda alla ampia bibliografia sull'argomento (Popper, 1968; National Research Council, 1990; de Marsily e al., 1992; Anderson e Woessner, 1992; Konikow e Bredehoeft, 1992; Oreskes et al., 1994; Rykiel, 1994; Refsgaard e Knudsen, 1996; Refsgaard e Storm, 1996; Tuteja e Cunnane, 1997; Seibert, 1999; Oreskes e Belitz, 2001; ecc).

Al di là delle diverse posizioni appare evidente che se si persegue, anche nei limiti prima indicati, l'obiettivo di costruire un modello perfetto la

validazione è il momento essenziale di questa costruzione, perché consente di formulare in termini oggettivi un giudizio di merito e consente di identificare i punti deboli che devono essere migliorati.

Per far questo occorre liberarsi in primo luogo delle incertezze lessicali ed è poi necessario favorire l'identificazione di procedure di validazione condivise ed accettate, giungendo alla definizione di veri e propri protocolli di validazione.

Per l'aspetto lessicale si può ragionevolmente sostenere che verifica e validazione possano essere considerati termini sostanzialmente analoghi da utilizzare indifferentemente per indicare l'intera procedura e il risultato che ne consegue. Il termine validazione, tuttavia, appare preferibile, anche perché entrato ormai nel lessico tecnico più ampiamente diffuso. I test, invece, sono gli algoritmi utilizzati per la validazione. Un procedimento di validazione si articola in genere su più test.

Per quanto riguarda, invece, i protocolli la strada è appena agli inizi e sono necessarie adeguate iniziative per giungere ad una proposta concreta a livello internazionale, magari partendo da proposte maturate in più ristretti e omogenei ambiti nazionali. Questa è la strada obbligata anche per giungere alla certificazione e all'accreditamento, che appaiono sempre più necessari visto la crescente proliferazione dei modelli.

In questa più ampia prospettiva possono essere delineati alcuni elementi che dovrebbero caratterizzare una procedura di validazione di un modello, che non si limiti alla mera buona riproduzione dei dati osservati, ma si ponga il più ambizioso proposito di descrivere i fenomeni che si sviluppano nel sistema naturale.

La validazione, pertanto, deve riguardare almeno due aspetti:

- la capacità del modello di riprodurre adeguatamente il comportamento del sistema reale, evidenziando un accordo tra dati osservati e dati simulati soddisfacente e tale da garantire un adeguato livello di affidabilità per la previsione dei comportamenti futuri (*capacità di previsione*).
- la capacità del modello di descrivere correttamente i fenomeni idrologici di base che avvengono nel sistema naturale (*capacità di rappresentazione dei fenomeni*).

La validazione della capacità di previsione non è, infatti, sufficiente, perché fornisce una visione incompleta della validità del modello, dal momento

che rende solo parzialmente plausibile estenderne l'applicazione nel tempo e non ne consente alcuna estensione nello spazio. Non è possibile, infatti, utilizzare un modello così validato, per prevedere il comportamento del bacino nel caso subisca cambiamenti significativi, e non è possibile prevedere eventi in altri bacini, simili ma non adeguatamente strumentati.

La validazione della capacità di rappresentazione ha senso solo se il modello è sufficientemente complesso e articolato e dipende fortemente dalla quantità e dalla qualità dei dati disponibili. Alcuni test di validazione di questo tipo sono, tuttavia, possibili anche in presenza di dati limitati, come sarà nel seguito illustrato.

Test di validazione

Un classico riferimento ai possibili test di validazione è quello sviluppato da Klemeš (1986b) anche se si riferisce a modelli idrologici concentrati. I metodi indicati sono quattro:

Split sample test – la validazione si effettua con dati diversi da quelli utilizzati per la taratura. Si presuppone che il bacino sia in condizioni stazionarie.

Differential split-sample test – si verificano le prestazioni del modello in condizioni differenti (clima, uso del suolo, etc.) da quelle che caratterizzano la fase di taratura.

Proxy-basin test – si verifica la capacità del modello applicandolo ad un bacino diverso da quello utilizzato nella taratura. Si suppone che i due bacini siano idrologicamente simili. Nel primo bacino i valori dei parametri sono ottenuti mediante taratura, utilizzando i dati sperimentali. Nel secondo bacino i parametri non sono tarati sulla base dei dati sperimentali, ma sono fissati in modo euristico, sulla base del raffronto tra le caratteristiche dei due bacini. I dati sperimentali del secondo bacino sono, quindi, utilizzati esclusivamente per la verifica.

Proxy-basin differential split-sample test - è una combinazione dei due casi precedenti. La taratura del modello è effettuata su un bacino e la verifica è eseguita su un bacino con caratteristiche differenti. Anche in questo caso è ammessa solo la modifica euristica dei valori dei parametri in relazione alle caratteristiche del bacino, senza effettuare una taratura con i dati sperimentali.

Il primo di questi quattro test riguarda solo la capacità di previsione. Gli altri possono risultare utili anche per validare la capacità di rappresentazione dei fenomeni.

I test proposti da Klemeš si riferiscono a modelli concentrati e considerano quale unica grandezza di confronto la portata nella sezione di chiusura, ma non ci sono particolari problemi ad adattarli per altre variabili, anche distribuite, come il livello della falda, l'umidità nello strato non saturo, l'evapotraspirazione, attraverso un confronto tra l'andamento osservato e simulato delle variabili considerate.

Per apprezzare la capacità di rappresentazione, tuttavia, possono risultare più appropriati altri test. Se si dispone, ad esempio, di misure sperimentali riguardanti non solo le portate nella sezione di chiusura ma anche altre grandezze idrologiche, si possono utilizzare le misure di portata per stimare i parametri del modello, e le altre misure per valutare la capacità di rappresentazione del modello.

Negli ultimi anni sono sempre più frequenti in letteratura gli esempi di test riconducibili a questa tipologia, che utilizzano dati spazialmente distribuiti per una cosiddetta verifica "interna" dei modelli (Franks et al., 1998; Western et al., 1999; Grayson e Blosch, 2000), considerando misure in situ (portate in sezioni intermedie, livelli piezometrici, contenuto d'acqua, etc.) e dati ricavati da remote sensing (estensione aree sature, contenuto d'acqua, copertura nevosa, etc.). Si tratta di approcci molto interessanti anche se limitati a bacini sperimentali, per i quali la disponibilità di dati è molto maggiore di quella usuale, e se in molti casi le valutazioni sono basate su indicazioni di tipo qualitativo derivate dall'andamento spaziale dei residui.

Altro test molto utile per valutare i punti di forza e i punti di debolezza del modello proposto è il confronto con i risultati di altri modelli fisicamente basati, applicati nella simulazione degli stessi eventi, osservati o teorici. Perché un simile test sia significativo è necessario che i modelli da confrontare siano caratterizzati da una diversa struttura, e utilizzino per la taratura dati e tecniche anche esse diverse.

Altrettanto utile è l'applicazione del modello da validare a casi di studio particolarmente significativi, basati su dati affidabili, raccolti in bacini sperimentali attrezzati (test cases). Test di questo tipo appaiono in ogni caso necessari e devono essere utilizzati sistematicamente.

Il blind test, anch'esso suggerito da Klemeš, prevede di procedere alla validazione del modello senza alcuna taratura preventiva, assegnando ai parametri valori congruenti con le caratteristiche del bacino considerato. È quindi applicabile solo a modelli che hanno parametri di chiaro significato fisico. Il blind test, utilizzato in questo caso in un'ottica diversa da quella del tradizionale

approccio bayesiano, appare particolarmente adatto a validare modelli fisicamente basati. Qualora poi venga applicato, contemporaneamente e con esito positivo, a più variabili idrologiche distribuite il test costituisce il massimo livello di validazione della capacità di rappresentazione del modello.

C'è tuttavia da osservare che molti dei test finora ricordati non sembrano in grado di verificare l'effettiva capacità dei modelli fisicamente basati di rappresentare la natura distribuita dei fenomeni idrologici. È, pertanto necessario utilizzare e mettere a punto test in grado di verificare tale capacità e di valutare, più in generale, la coerenza idrologica della formulazione adottata per il modello (Lane e Richards, 2001). Si tratta di test che, spesso, prescindono dal confronto con valori osservati, essendo in alcuni casi nati proprio per sopperire alla mancanza di dati sperimentali. Questi test si basano sul cosiddetto "buon senso" idrologico, ossia sulla rispondenza dei risultati forniti dal modello alle aspettative basate sulle acquisizioni teoriche più largamente condivise nella comunità scientifica circa i fenomeni idrologici di base.

Sono procedure forse meno rigorose e che introducono un elevato grado di soggettività, ma che possono essere molto utili per valutare la capacità del modello di riprodurre il mondo reale. Sono quindi da considerare come test integrativi, finalizzati solo alla validazione della capacità di rappresentazione.

Seibert e McDonnell (2002) considerano i cosiddetti "soft data", ovvero informazioni spesso solo qualitative riguardanti il funzionamento del bacino, formalizzate attraverso la definizione di regole fuzzy. Altri autori (Weiler e Naef, 2003) propongono l'applicazione di esperimenti virtuali che consentono l'analisi di diversi aspetti del modello, con particolare riferimento alla capacità di riprodurre i processi idrologici dominanti. Grayson e Bloschl (2000) ricercano, invece, possibili legami logici e teoricamente coerenti tra i valori dei parametri e delle variabili simulate e le caratteristiche topografiche del bacino, supponendo che relazioni scarsamente verosimili siano indicative di una intrinseca debolezza del modello.

La verifica del buon senso idrologico appare un momento essenziale per la validazione di modelli distribuiti fisicamente basati. È necessario però identificare con il necessario dettaglio e le necessarie motivazioni quali aspetti caratteristici dei fenomeni modellati devono essere prese in considerazione, mettendo a punto specifici test per verificare la capacità del modello di rappresentarli correttamente. In particolare i test sul buon senso

idrologico dovrebbero essere finalizzati a verificare, attraverso idonee simulazioni, almeno le seguenti peculiarità:

- la intrinseca congruenza dei valori assunti dai parametri e dalle grandezze idrologiche considerate;
- il funzionamento dei singoli moduli che compongono il modello e la plausibilità dei risultati da essi forniti;
- la capacità di riprodurre un'attendibile organizzazione spaziale delle variabili distribuite;
- l'attendibilità dei risultati delle simulazioni effettuate in bacini con diverse caratteristiche;
- per i modelli completi che si propongono di riprodurre l'intero ciclo idrologico, è utile verificare anche la verosimiglianza dei risultati delle simulazioni in condizioni diverse da quelle osservate e in particolare in condizioni

estreme (piogge intense e prolungate, lunghi periodi siccitosi).

In figura 12 è riportato a titolo di esempio il risultato di un test finalizzato a verificare la capacità di un modello di discriminare tra contributi di tipo hortoniano, dunniano e sub-superficiale (Versace et al., 2004; Biondi, 2004). Si vede in particolare che, come era da attendersi, il contributo hortoniano diventa predominante man mano che aumenta l'intensità di pioggia e/o diminuisce la capacità di infiltrazione per effetto della persistenza del periodo piovoso.

La figura 13, tratta dallo stesso lavoro, mostra l'effetto simulato dello svuotamento della falda in assenza di precipitazione e trascurando i fenomeni di evapotraspirazione. L'andamento temporale del livello della falda è confrontato con il valore di un indice topografico attraverso un box-plot che evidenzia l'intervallo che contiene il 75% dei dati osservati ed i valori estremi di tali dati. Sia lo svuotamento che la distribuzione finale sono coerenti con la topografia del sistema.

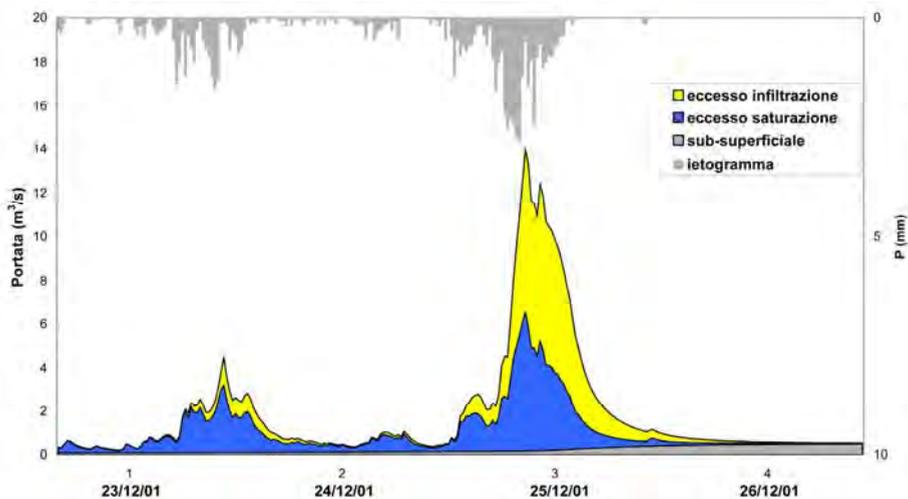


Figura 12. Il modello deve essere in grado di discriminare i contributi al deflusso di piena generati con diverse modalità: eccesso di infiltrazione (o *hortoniano*), eccesso di saturazione (o *dunniano*), sub-superficiale. In figura è il caso del modello RISE (Runoff by Infiltration and Saturation Excess).

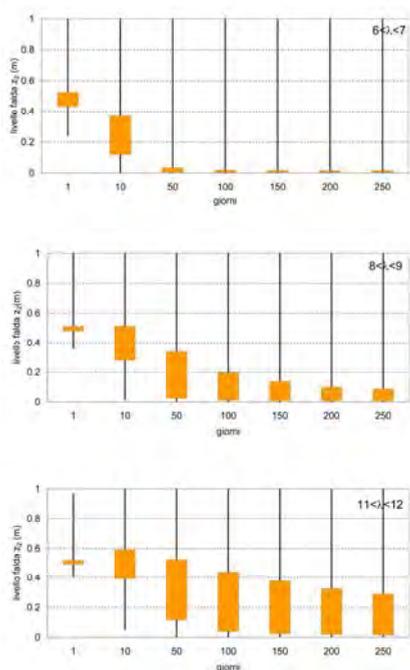


Figura 13. Il modello deve essere in grado di riprodurre l'andamento delle grandezze idrologiche in circostanze particolari. La figura, attraverso dei box plot relativi al 75% dei dati osservati mostra lo svuotamento della falda, in assenza di precipitazioni, in aree caratterizzate da diverse classi dell'indice topografico λ .

È da osservare che non tutti i modelli proposti in letteratura permettono di riprodurre tale comportamento, in particolare nei casi nei quali la simulazione avviene attraverso una successione di stati di equilibrio, che implicano una corrispondenza biunivoca tra immagazzinamento e deflusso, il fenomeno dello svuotamento non può essere simulato in modo plausibile.

In estrema sintesi, ferma restando la necessità che la comunità scientifica si faccia carico di definire protocolli ufficiali, appare ragionevole assumere che una procedura, finalizzata alla validazione non solo della capacità di previsione di un modello, ma anche della sua capacità di rappresentazione dei fenomeni, per essere accettabile debba contenere i seguenti test:

- confronto tra dati osservati e simulati, non utilizzati per la taratura;

- congruenza dei valori assunti dai parametri e dalle grandezze idrologiche;
- verosimiglianza delle simulazioni condotte sullo stesso bacino in condizioni diverse da quelle osservate;
- applicabilità a bacini con caratteristiche analoghe a quelle del bacino considerato, con stima euristica dei parametri del modello;
- confronto con i risultati di altri modelli;
- applicazione a test cases;
- test sul buon senso idrologico.

Nel caso di modelli particolarmente avanzati e disponendo di adeguate banche dati si può procedere ad ulteriori e più significativi test:

- confronto tra valori osservati e simulati di altre grandezze idrologiche distribuite e non utilizzate per la taratura;
- blind test.

Incertezza

Il modello non coincide con la realtà, perché riesce a cogliere solo una parte della complessità del sistema naturale. Ci possono essere, infatti, errori nella struttura del modello e nei valori attribuiti ai parametri. Ma ci possono essere errori anche nei dati di input o in quelli di output utilizzati per la taratura.

Anche il modello più accurato, pertanto, fornirà, in sede di previsione, un valore dell'output al tempo t diverso da quello che si verificherà realmente nel sistema naturale.

Lo scostamento tra i due valori rappresenta l'incertezza e può essere valutato solo in termini probabilistici. Il vero output può essere, perciò, trattato come una variabile casuale e ad essa possono essere attribuiti intervalli di confidenza di assegnata probabilità.

La valutazione dell'incertezza e la determinazione dei relativi intervalli di confidenza riveste grande importanza in sede di previsione e rappresenta un momento essenziale nella costruzione di un modello. Se, ad esempio, si considera come output il valore della portata nella sezione di chiusura del bacino, per effetto dell'incertezza esiste una probabilità che la portata effettiva possa superare un qualche valore soglia

Q^* anche nel caso in cui il modello fornisca valori $Q_{sim} < Q^*$. Tale probabilità è evidentemente tanto più grande quanto maggiore è l'incertezza.

La misura dell'incertezza può essere considerata anche come una fase della validazione. Un'incertezza rilevante, infatti, può indicare una modesta capacità del modello di rappresentare i fenomeni naturali, e, al limite, può rendere inutilizzabile il modello anche a soli fini di previsione, minandone alla radice la validità.

Le cause dell'incertezza sono molteplici:

- incertezza nei dati di ingresso nel modello, ossia dei dati di precipitazione osservati, stimati o previsti e nella struttura spaziale e temporale dei dati che definiscono lo stato del bacino;
- incertezza nei dati in uscita usati per la taratura del modello;
- incertezza nei parametri del modello, spesso ottenuti per taratura in base ad un'ottimizzazione effettuata con tecniche che possono essere più o meno precise ma sono comunque approssimate, e con dati, in ingresso e in uscita, che si è visto sono a loro volta incerti;
- incertezza nella struttura del modello, legata alla sua intrinseca incapacità di riprodurre correttamente i meccanismi fisici dei processi coinvolti nella formazione dei deflussi. Imprecisioni e/o omissioni che possono riguardare la modellazione dei singoli processi idrologici e/o la loro interconnessione. Perciò, anche conoscendo i "veri" input e non commettendo errori nella scelta dei parametri, la simulazione risulterebbe affetta da un'approssimazione dovuta all'incertezza del modello.

Le tecniche proposte nella letteratura per la stima dell'incertezza sono numerose. In questa sede ci limiteremo ad illustrare in modo sintetico quelle che, per la loro diffusione e/o le loro caratteristiche intrinseche, sembrano più meritevoli di attenzione:

- la GLUE
- l'approccio Meta-Gaussiano
- il BSF di Krzysztofowicz.

Ci sono naturalmente altri metodi interessanti, che riguardano prevalentemente la stima dell'incertezza parametrica, come NLFIT

(Kuczera, 1994), PEST (Brockwell e Davis, 1987), la procedura BaRE (Bayesian Recursive Estimation) proposta da Thienmann et al. (2001), l'algoritmo SCEM-UA (Vrugt et al., 2003) e altri ancora. Tali metodi non saranno trattati in questa sede.

La GLUE

La metodologia GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation) proposta da Beven e Binley (1992), ha trovato in questi anni vasta applicazione anche per la sua relativa semplicità. Il metodo si basa sulla natura probabilistica dell'identificazione dei parametri, e consiste nel riconoscere i set di parametri che possono essere ritenuti accettabili e nel determinare la fiducia che si ripone in ciascuno di essi attraverso una "misura di verosimiglianza".

La procedura classica prevede di effettuare numerose simulazioni con il modello. Ciascuna di esse è eseguita utilizzando un diverso set di parametri θ_i , estratto in maniera casuale, con tecnica Monte-Carlo, da uno spazio parametrico delimitato a priori in base alla conoscenza del fenomeno. Di solito si ipotizza una distribuzione uniforme sull'intervallo dei valori ammissibili.

A ciascuna delle simulazioni è associato un peso attraverso una misura di verosimiglianza, $L(\theta_i | \mathbf{y})$, che è una funzione del vettore dei parametri, condizionata ai dati osservati \mathbf{y} . Tale misura è ricavata, in genere, a partire da un criterio quantitativo di stima della bontà dell'adattamento tra dati osservati e simulati che, secondo le indicazioni degli autori, deve avere come caratteristiche quella di crescere in maniera monotona con le prestazioni migliori e di associare valori nulli a configurazioni ritenute non soddisfacenti. Il criterio di efficienza più spesso utilizzato è il coefficiente di Nash e Sutcliffe. Esempi di applicazione di altre misure sono riportati in Romanowicz et al. (1994), Freer et al. (1996), Beven e Freer (2001).

In relazione ad una soglia di ammissibilità fissata dal modellatore alcune simulazioni possono essere rigettate o, adottando la terminologia introdotta da Spear e Hornberger (1980), essere considerate come non *behavioural*. La classificazione non è assoluta, ma da intendersi come un giudizio qualitativo fortemente condizionato dalla scelta del criterio di efficienza e della soglia.

I pesi associati alle N simulazioni ritenute *behavioural* sono, poi, normalizzati in modo che

la loro somma sia pari ad 1. Si ottiene così la misura di verosimiglianza cercata.

In fase di applicazione si utilizzano tutte le configurazioni *behavioural*. Per ogni istante temporale t le varie simulazioni sono pesate con le rispettive misure di verosimiglianza. Si ottiene in questo modo una distribuzione di frequenza cumulata delle portate per ogni t , e si stimano le fasce di confidenza e i relativi valori limite, attraverso la stima degli opportuni quantili.

Gli autori riconducono la loro metodologia ad un'analisi di tipo bayesiano, sia pure intesa in un'accezione molto generale, che consente di aggiornare i pesi associati alle differenti combinazioni di parametri sulla base dei nuovi dati osservati. La relazione proposta è:

$$L(\theta_i | y_1, y_2) = \frac{L(\theta_i | y_1)L(\theta_i | y_2)}{C} \quad (1)$$

in cui $L(\theta_i | y_1)$ è da intendersi come una verosimiglianza "a priori" del set di parametri θ_i , formulando un'ipotesi sulla distribuzione di probabilità dei parametri, oppure utilizzando, se disponibile, un set di dati sperimentali y_1 ; $L(\theta_i | y_2)$ è la misura della verosimiglianza valutata in corrispondenza di nuovi dati campionari, utilizzando come si è visto un criterio di efficienza; $L(\theta_i | y_1, y_2)$ è la verosimiglianza "a posteriori" e C è una costante di normalizzazione, calcolata in modo che la somma di $L(\theta_i | y_1, y_2)$ sia pari a 1.

Per la natura sequenziale del teorema di Bayes la distribuzione ottenuta potrà essere usata come distribuzione "a priori" nel periodo successivo. Il risultato atteso è quello di osservare una progressiva riduzione dell'incertezza all'aumentare delle informazioni disponibili.

Più di recente Beven (2002) ha proposto di estendere l'approccio GLUE considerando nell'analisi non più un solo modello, ma più modelli antagonisti. Questa procedura conduce fino alle conseguenze estreme il concetto di equifinalità, già discusso a proposito del modello perfetto, ed è il punto cardine del "blueprint alternativo" proposto dall'autore per individuare la risposta di un sistema idrologico. L'idrologo, quindi, non deve scegliere tra più modelli e tra più set di parametri. Ogni modello e il relativo set parametrico concorreranno a determinare la risposta idrologica con il peso che riusciranno a conquistarsi con i risultati delle applicazioni. Un

peso che può essere anche nullo se essi risultano non behavioural.

La procedura GLUE si presta a diverse considerazioni.

In primo luogo i quantili che limitano le fasce di confidenza si basano sull'assunzione che i pesi ricavati attraverso il confronto con i dati di taratura siano validi anche per la stima dell'incertezza in fase di previsione. Pertanto, essendo condizionati all'input del modello, essi non sono rappresentativi dell'incertezza totale. E questo è un limite della procedura.

Positivo è, invece, il fatto che la GLUE consenta di rappresentare la non linearità del sistema in quanto le simulazioni che contribuiscono a definire gli intervalli di confidenza, ad ogni istante, possono essere differenti.

Anche sulla capacità della GLUE di riprodurre stime secondo le regole dell'inferenza bayesiana ci sono molte perplessità (Thienmann et al., 2001; Gupta et al., 2003). In particolare è discutibile che attraverso l'uso del coefficiente di Nash e Sutcliffe, o di alcune sue varianti che considerano un coefficiente di forma, sia rispettata la capacità di "apprendimento" tipica del paradigma bayesiano. La tecnica di calcolo produce, infatti, un appiattimento progressivo della funzione di verosimiglianza, e, inoltre, fornisce risultati diversi se applicata in modo unitario ad un insieme di osservazioni o in modo disaggregato ripetendo la procedura, in successione, per più sottoinsiemi delle medesime osservazioni.

Un altro limite della procedura è l'eccessiva soggettività delle scelte che l'implementazione della GLUE richiede, e che riguardano: i modelli da considerare, il range di variazione da assegnare ai parametri, la loro distribuzione a priori, la funzione di verosimiglianza, la soglia discriminante tra simulazioni *behavioural* e *non behavioural*.

Infine, sebbene il metodo sia molto semplice, le richieste in termini di carichi computazionali non sono trascurabili. Per ciascuno dei modelli considerati sono, infatti, necessarie migliaia di realizzazioni per campionare adeguatamente lo spazio parametrico. Questo fatto, sebbene l'approccio sia del tutto generale, ne limita l'applicazione nel caso di modelli distribuiti fisicamente basati.

L'approccio Meta-Gaussiano

Uno degli approcci proposti è il cosiddetto modello Meta-Gaussiano (Montanari e Brath, 2004), basato sull'analisi delle proprietà statistiche degli errori del modello condizionate rispetto al dato stimato. Il metodo richiede preliminarmente la taratura del modello e quindi accetta il concetto di ottimalità rispetto a quello di equifinalità, nel senso che ipotizza l'esistenza di un solo set di parametri ottimo e non di più set tutti validi, pur con peso diverso, come è il caso della GLUE.

La tecnica è basata sull'adattamento di un modello probabilistico agli errori commessi nella simulazione dei deflussi storici.

In particolare si definiscono con:

- $h_t, t = 1, \dots, n$, una serie di n osservazioni di portata,
- s_t , i corrispondenti valori di portata simulati con il modello,
- $e_t = h_t - s_t$, l'errore commesso nella simulazione,

realizzazioni, rispettivamente, dei processi stocastici $H(t), S(t), E(t)$.

L'obiettivo del metodo è la stima della distribuzione di probabilità di $E(t)$, condizionata al valore contemporaneo di $S(t)$, che consente di identificare le fasce di confidenza.

Tale stima si effettua con un modello Meta-Gaussiano (Kelly e Krzysztofowicz, 1997), che trasforma le effettive distribuzioni marginali campionarie di $S(t)$ e di $E(t)$ in distribuzioni normali standardizzate $NS(t)$ ed $NE(t)$. Si ipotizza che tali distribuzioni siano stazionarie ed ergodiche e abbiano una cross dipendenza lineare

$$Ne_t = \rho_{NE,NS}(0)Ns_t + N\epsilon_t \quad (2)$$

dove $\rho_{NE,NS}(0)$ è il coefficiente di cross correlazione di Pearson di lag zero tra $NS(t)$ ed $NE(t)$, ed Ne_t è la realizzazione di un processo stocastico $N\Theta(t)$ stocasticamente indipendente da Ns_t e normalmente distribuito con media 0 e varianza $[1 - \rho_{NE,NS}^2(0)]$.

Se tali ipotesi sono verificate è possibile determinare la distribuzione di probabilità di $NE(t)$ condizionata a $NS(t)$, e quindi le fasce di confidenza che definiscono l'incertezza. È da osservare che con questo metodo si stima un'incertezza globale, senza possibilità di separare gli apporti delle diverse cause di approssimazione.

Tale incertezza è, inoltre, relativa allo specifico modello ed al set di parametri predefinito.

Il principale limite del modello meta-gaussiano è che non sempre le ipotesi formulate sono verificate, in particolare per quanto riguarda i residui Ne_t , che possono non seguire la distribuzione normale e/o risultare eteroschedastici. Montanari e Brath (2004) per ovviare a questa difficoltà propongono di effettuare una trasformazione preliminare della serie $E(t)$ con risultati che appaiono promettenti. L'uso di strutture più complesse in luogo della (2) non sembra, invece, produrre significativi miglioramenti (Montanari e Brath, 2004).

Il BFS di Krzysztofowicz

Per la stima dell'incertezza totale della previsione Krzysztofowicz (1999) ha proposto una struttura metodologica basata sull'inferenza bayesiana, denominata Bayesian Forecasting System (BFS).

L'incertezza nella previsione dell'input è assunta come la principale sorgente di errore nella risposta del modello. L'impostazione, già presente in lavori precedenti (Krzysztofowicz, 1993), è ripresa ed approfondita in diverse pubblicazioni successive (Krzysztofowicz e Kelly, 2000; Kelly e Krzysztofowicz, 2000; Krzysztofowicz, 2001; Krzysztofowicz e Herr, 2001; Krzysztofowicz, 2002), appare molto interessante e sicuramente suscettibile di significativi sviluppi.

Krzysztofowicz decompone l'incertezza di un modello idrologico in tre aliquote, secondo l'approccio classico dell'inferenza statistica: *operazionale, di input e idrologica*. La prima aliquota è causata da dati errati, errori umani nelle applicazioni; è una sorgente esterna al sistema di previsione e non viene presa in considerazione. L'incertezza degli input è legata solo a quella parte dei dati di ingresso che con la loro variabilità influenzano maggiormente il risultato del modello (random input). Gli altri dati di ingresso sono considerati come deterministici (input deterministico). Per esempio, in un modello di previsione delle portate a breve termine, la principale fonte di incertezza è costituita dalle piogge future previste dal modello meteorologico, trattate come random input.

L'evapotraspirazione potenziale che è anche un dato di input è meno rilevante e viene considerata come input deterministico.

L'incertezza idrologica, infine, comprende tutte le altre fonti di incertezza connesse: alla struttura del modello, alla stima dei parametri, alla stima

degli input considerati deterministici, agli errori di misura delle quantità fisiche.

Nella costruzione della sua teoria Krzysztofowicz utilizza numerosi vettori casuali. I più importanti sono:

- **W** input del modello
- **S** output del modello
- **H** risposta del sistema naturale.

Sono inoltre considerati i seguenti vettori:

- **Y** stato del sistema
- **V** parametri del modulo di generazione di **W**
- **U** input deterministico nel modello
- **H₀** valori di **H** osservati, fino all'istante in cui si effettua la previsione

Nel suo schema Krzysztofowicz distingue due processori: il primo (Hydrologic Uncertainty Processor) quantifica l'incertezza idrologica

considerando l'input perfetto, l'altro processore (Precipitation Uncertainty Processor) quantifica l'incertezza dell'input nella risposta del modello considerato non affetto da errori.

La stima dell'incertezza idrologica avviene quindi nell'ipotesi che l'input **W** sia perfetto.

La funzione chiave dell'intera procedura è la funzione di verosimiglianza in senso bayesiano $f(s|h, y)$ che rappresenta la probabilità di avere un'uscita del modello eguale a **s** quando lo stato del sistema è **y** e la risposta del sistema naturale è **h**. Nelle notazioni precedenti si è indicato, ovviamente, con la lettera minuscola una determinazione del vettore identificato dalla corrispondente lettera maiuscola.

La stima della funzione di verosimiglianza può avvenire sulla base di adeguati dati sperimentali, confrontando i risultati noti del sistema naturale con le risposte simulate dal modello per particolari valori di **y** (Figura 14, nella quale si assume un valore di **y** unico).

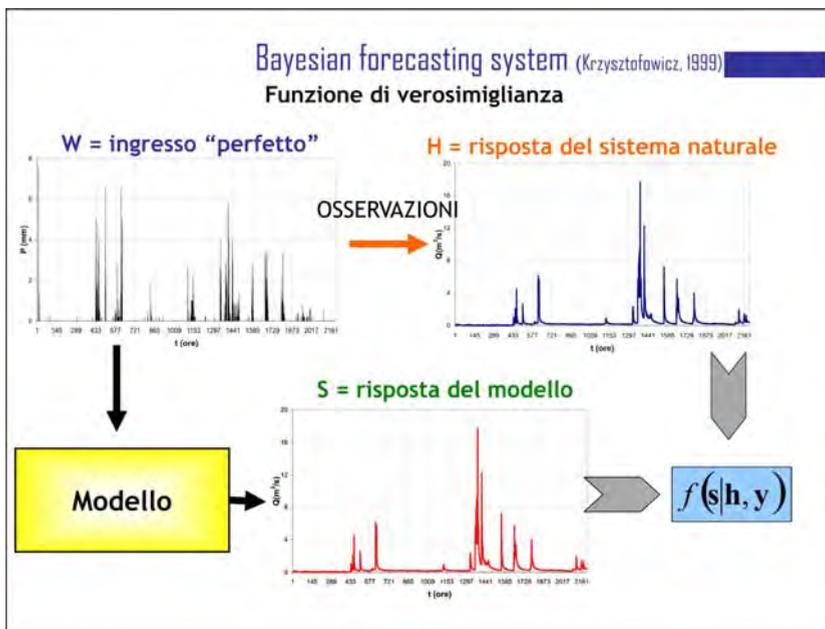


Figura 14. La stima della funzione di verosimiglianza è uno dei momenti chiave del BFS. Si ottiene confrontando la risposta del sistema naturale e quella del modello considerato.

Seguendo l'approccio bayesiano la densità di probabilità della variabile di interesse \mathbf{H} può essere stimata a priori sulla base dei dati osservati. Tale funzione di densità si indica con $g(\mathbf{h}|\mathbf{h}_0)$. Nella stima a posteriori la funzione di densità dipende, nell'ipotesi ricordiamo di input perfetto, dai dati osservati e quindi dalla densità di probabilità a priori, dall'output del modello e dallo stato del sistema. Si può quindi indicare (Figura 15) come $\varphi(\mathbf{h}|\mathbf{s}, \mathbf{h}_0, \mathbf{y})$.

Applicando il teorema di Bayes si ottiene:

$$\varphi(\mathbf{h}|\mathbf{s}, \mathbf{h}_0, \mathbf{y}) = \frac{f(\mathbf{s}|\mathbf{h}, \mathbf{y})g(\mathbf{h}|\mathbf{h}_0)}{k(\mathbf{s}|\mathbf{h}_0, \mathbf{y})} \quad (3)$$

dove

$$k(\mathbf{s}|\mathbf{h}_0, \mathbf{y}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\mathbf{s}|\mathbf{h}, \mathbf{y})g(\mathbf{h}|\mathbf{h}_0) d\mathbf{h} \quad (4)$$

è un fattore normalizzante che esprime la densità di probabilità dell'output \mathbf{S} (Figura 16).

Per identificare la $\varphi(\mathbf{h}|\mathbf{s}, \mathbf{h}_0, \mathbf{y})$ è stato proposto un approccio Meta-Gaussiano del tipo di quello descritto nel precedente paragrafo.

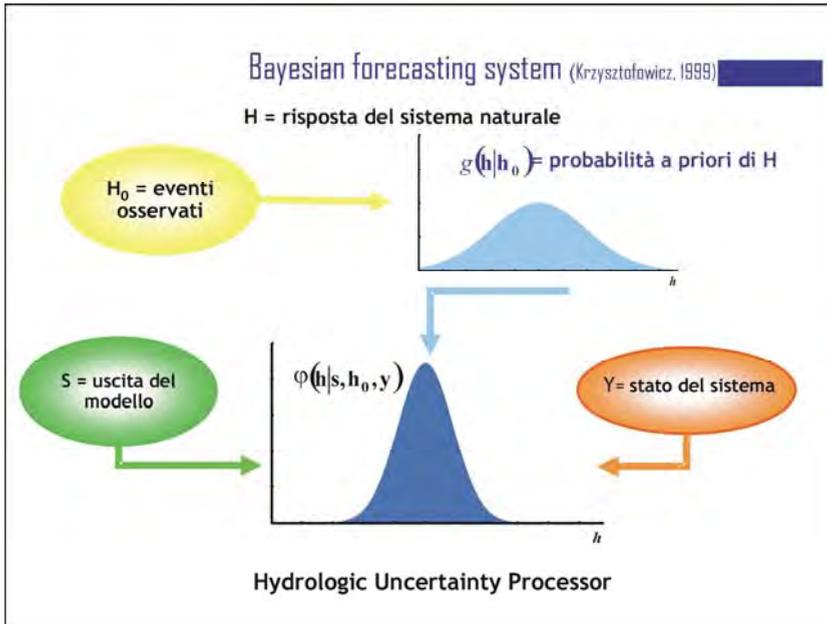


Figura 15. Il BFS prevede due processori. Il primo (*Hydrologic Uncertainty*) ipotizza un input perfetto e misura la sola incertezza legata al modello, che, come puntualizzato nella successiva Figura 16, può essere stimata sulla base dello stato del sistema \mathbf{Y} , dell'uscita del modello \mathbf{S} e della probabilità a priori di \mathbf{H} .

Quest'ultima si ottiene in base alle osservazioni sperimentali \mathbf{H}_0 .

L'altro processore, il Precipitation Uncertainty Processor, misura gli effetti che l'incertezza nell'input produce sull'output del modello, nell'ipotesi che non ci sia incertezza idrologica e che quindi il modello sia perfetto. Ciò implica che il modello simuli il comportamento del bacino per diverse determinazioni di \mathbf{W} .

Ricordando il significato dei simboli, la variabile \mathbf{S} dipende da \mathbf{V} e da \mathbf{U} , che rappresentano rispettivamente i parametri dello

stimatore degli input random e gli input deterministici. La densità di probabilità di \mathbf{S} può quindi scriversi come $\pi(\mathbf{s}|\mathbf{u}, \mathbf{v})$, che quantifica appunto l'incertezza riconducibile ai soli input random (Figura 17). Tale funzione deve essere stimata on line ogni volta che si deve effettuare una previsione, ricorrendo a tecniche di tipo Montecarlo.

Combinando i risultati dei due processori si ottiene (Figura 18) l'incertezza totale, che dipende quindi da \mathbf{H}_0 , \mathbf{Y} , \mathbf{U} , e \mathbf{V} :

$$\psi(\mathbf{h}|\mathbf{h}_0, \mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\mathbf{h}|\mathbf{s}, \mathbf{h}_0, \mathbf{y}) \pi(\mathbf{s}|\mathbf{u}, \mathbf{v}) d\mathbf{s} \quad (5)$$

In estrema sintesi con l'approccio di Krzysztofowicz si hanno due funzioni di

probabilità di \mathbf{H} : g che esprime la probabilità a priori, basata sulle sole osservazioni storiche e ψ che ne rappresenta la previsione probabilistica. Il passaggio dall'una all'altra avviene sostanzialmente sulla base di una duplice informazione: la previsione delle piogge, la trasformazione afflussi-deflussi operata dal modello.

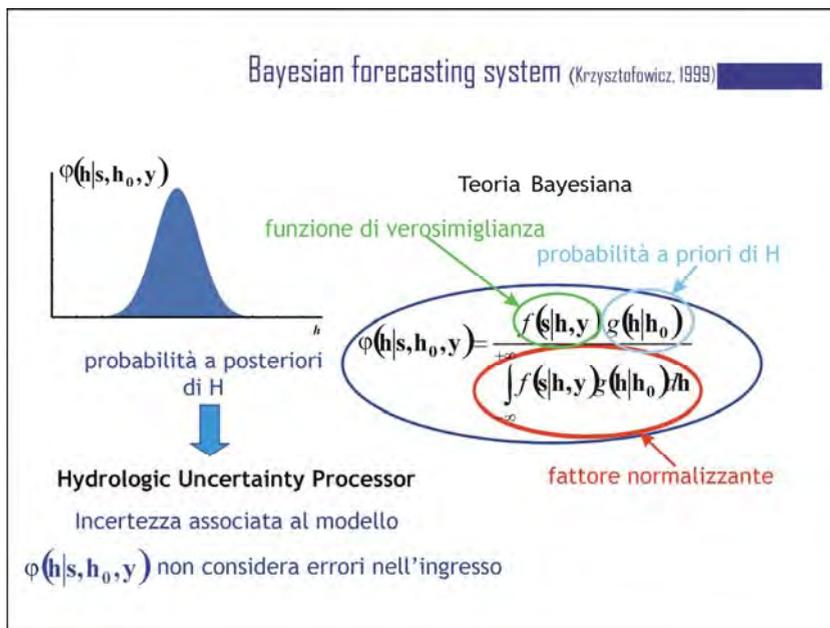


Figura 16. La figura schematizza la procedura bayesiana per la stima della probabilità a posteriori di \mathbf{H} , in base probabilità a priori di \mathbf{H} (Figura 15) e della funzione di verosimiglianza (Figura 14)

È interessante osservare che l'approccio di Krzysztofowicz risulta congruente in alcuni casi particolari. Se, infatti, la previsione delle piogge è priva di contenuto informativo o se il modello di trasformazione è incapace di simulare il fenomeno, si ritrova, coerentemente con quanto era da attendersi che la previsione probabilistica e quella a priori sono la stessa cosa.

In modo analogo se la previsione delle piogge è perfetta, la previsione probabilistica ψ coincide con la φ ossia con la densità di probabilità a posteriori, calcolata con la (3), sulla base dei risultati del modello. Se, infine, è il modello ad

essere perfetto la previsione probabilistica coincide con π , ossia con la funzione di densità dell'output del modello, che riflette la sola incertezza dell'input.

Il metodo appare, pertanto, robusto e capace tener conto in modo chiaro ed esplicito dei diversi fattori che concorrono a determinare l'incertezza. Tra quelli presenti in letteratura appare al momento il più promettente. Il limite principale è costituito dalla difficoltà di applicazione legata soprattutto alla mancanza dei dati necessari e in particolare di quelli da utilizzare per la stima della funzione $f(\mathbf{s}|\mathbf{h}, \mathbf{y})$.

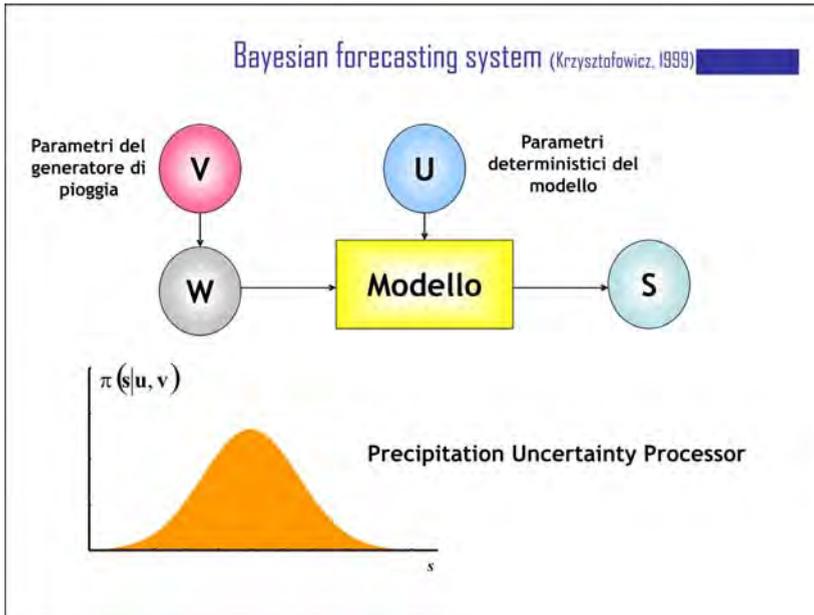


Figura 17. Il secondo processore (*Precipitation Uncertainty*) ipotizza un modello perfetto e misura la sola incertezza legata all'input pluviometrico, a sua volta legato al modello generatore di pioggia.

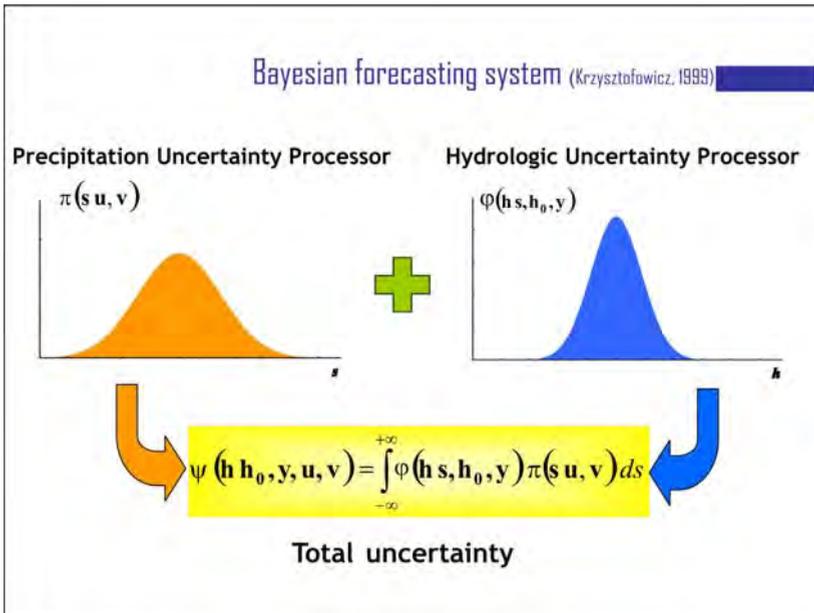


Figura 18. Le informazioni provenienti dai due processori si integrano per fornire l'incertezza totale del sistema di previsione, composto dal modello generatore delle piogge e dal modello di trasformazione afflussi-deflussi.

Aspetti idrologici nella valutazione della stabilità dei versanti.

La modellazione dei fenomeni idrologici è stata nel corso degli anni indirizzata prevalentemente a simulare la formazione dei deflussi superficiali, analizzando con maggiore attenzione quei momenti del ciclo idrologico a tal fine più rilevanti. Questa maggiore attenzione appare evidente anche nelle discussioni che attengono le questioni più generali e quindi anche le considerazioni fin qui svolte circa l'incertezza della stima, la validazione dei modelli, le aspettative e i limiti dell'Idrologia sono in larga misura riconducibili a dibattiti focalizzati sulla previsione dei deflussi superficiali.

Nella realtà l'interesse dell'Idrologia è ben più ampio e si estende anche verso temi non strettamente idrologici, nei quali il contributo dell'idrologo, in un più ampio contesto interdisciplinare, può risultare comunque efficace. Tra questi, in particolare, i settori che appaiono, al momento, più promettenti sono la Meteorologia, l'Ecologia, la Stabilità dei versanti.

Le prime due tematiche sono affrontate in questo Convegno nell'ambito dei seminari "Ecosistemi fluviali e sviluppo sostenibile" e "Dinamiche e controllo dei processi di dissesto idrogeologico", mentre in questa sede ci si soffermerà sul ruolo che la modellistica idrologica può svolgere nella valutazione della stabilità dei versanti.

È noto che l'attivazione dei movimenti franosi è in molti casi imputabile alle precipitazioni meteoriche che, prima dell'evento, interessano, direttamente o indirettamente, il versante.

La conoscenza delle relazioni che legano i due fenomeni risulta di grande utilità applicativa, perché fornisce gli elementi informativi necessari per attivare opportuni interventi di tipo strutturale o di tipo non strutturale quali i sistemi di preannuncio utilizzati nell'ambito di piani di protezione civile. In tali sistemi risulta, infatti, di straordinaria utilità poter associare alle piogge misurate in tempo reale e/o a quelle previste, la probabilità che si attivino movimenti franosi.

La letteratura tecnica fornisce numerosi esempi di modellazione delle relazioni tra piogge e frane, basate sull'analisi di dati relativi a movimenti franosi osservati, e riferite in genere a particolari aree geografiche o a specifici fenomeni. I modelli proposti risultano molto diversi tra loro perché sono differenti i meccanismi attraverso i quali le piogge possono influire sulla stabilità, a seconda delle caratteristiche litologiche, morfologiche e idrauliche

del terreno e degli strati che lo compongono (Cascini e Versace, 1986).

Nei versanti molto acclivi, la cui stabilità è in larga parte assicurata dalla presenza di pressioni neutre negative, piogge brevi ed intense possono ridurre o vanificare l'effetto della suzione, favorendo l'attivazione di movimenti corticali. Per le frane più profonde, invece, la mobilitazione può essere legata ad un innalzamento del livello di falda e ad un corrispondente aumento delle pressioni neutre. In questo caso le piogge critiche sono di minore intensità e di maggiore persistenza rispetto al caso precedente.

La differenza tra i modelli, tuttavia, deriva anche dalla diversa qualità e quantità di dati idrologici, idraulici e geotecnici disponibili, che determinano il livello di accuratezza che può essere raggiunto nella rappresentazione dei fenomeni reali. Nella gran parte dei casi sono, infatti, disponibili solo notizie relative alla data di mobilitazione della frana e alle caratteristiche essenziali del fenomeno (cinematismo, dimensione, litologia, ecc.); la modellazione di conseguenza non può che essere molto semplificata.

I modelli possono essere per comodità suddivisi in due grandi gruppi:

- modelli idrologici, che, sulla base degli eventi osservati, si limitano alla individuazione empirica di relazioni tra piogge e movimenti franosi, utilizzando prevalentemente l'informazione idrologica, quasi sempre circoscritta alla sola pioggia. Tali modelli sono finalizzati a individuare i valori soglia delle precipitazioni, al di sopra dei quali il movimento franoso potrebbe innescarsi;
- modelli completi di versante che, al contrario, tentano di riprodurre i fenomeni che avvengono nel pendio: l'infiltrazione, il movimento dell'acqua nella zona non satura e in quella satura, la conseguente distribuzione delle pressioni neutre, e in ultima analisi il grado di stabilità del pendio. Modelli di questo tipo richiedono una caratterizzazione morfologica, geotecnica e geologica di adeguato dettaglio.

Il modello idrologico classico è quello di Campbell (1975) realizzato per le colate di detrito della California meridionale. Il modello identifica come condizione critica una pioggia cumulata di almeno 250 mm, necessaria alla saturazione delle coltri superficiali permeabili, seguita da una pioggia

con intensità di almeno 6 mm/h capace di innescare il movimento del terreno già saturo.

Modelli riconducibili a questa tipologia sono stati proposti da molti altri autori (Lumb, 1975; D'Elia, 1975, 1979; Civita et al., 1975; Caine, 1980; Moser e Hohensin, 1983; Brand et al., 1984; Govi et al., 1984; Cancelli e Nova, 1985; Cannon e Ellen, 1985; Cascini e Versace, 1986; Keefer et al., 1987; Polloni et al., 1992; Morgan et al., 1997; Crosta, 1998; Corominas e Moya, 1999; Crozier, 1999; Flentje et al., 2000; Bonnard e Noverraz, 2001; Liu e Chen, 2003, e altri ancora).

Un modello riconducibile a questa categoria è il FLaIR (Forecasting of Landslides Induced by Rainfalls - Sirangelo e Versace, 1992) che può essere considerato come una generalizzazione degli altri modelli idrologici.

Il FLaIR valuta la propensione del versante all'instabilità attraverso una funzione $Y(t)$, detta funzione di mobilitazione, data dalla convoluzione tra l'intensità di infiltrazione $I(t)$ ed una funzione $\psi(t)$, detta funzione di trasferimento, caratteristica del singolo movimento franoso e quindi da determinare caso per caso:

$$Y(t) = c \int_{-\infty}^t \psi(t-s)I(s)ds \quad (6)$$

La funzione di mobilitazione può essere considerata come un semplice indicatore delle condizioni di stabilità del versante da comparare con valori critici di riferimento. La costante moltiplicativa c risulta perciò inessenziale.

Utilizzando uno schema a soglia, il modello FLaIR associa il valore della funzione di mobilitazione alla probabilità $P[E_t]$ di avere l'evento E_t , ovvero un movimento al tempo t :

$$P[E_t] = \begin{cases} 0 & \text{se } Y(t) \leq Y_{cr} \\ 1 & \text{se } Y(t) > Y_{cr} \end{cases} \quad (7)$$

In luogo della (7) possono essere adottati schemi più articolati nei quali la probabilità dell'evento varia con continuità al variare di $Y(t)$. Per stimare l'intensità di infiltrazione $I(t)$ si utilizzano schemi semplificati. In particolare si assume che, a scala giornaliera, l'infiltrazione sia proporzionale alla precipitazione, almeno per valori di pioggia non eccedenti un valore limite, al di là del quale l'infiltrazione si assume costante.

L'identificazione della funzione di trasferimento e la stima dei relativi parametri avvengono sulla

base dell'informazione relativa ad eventi di mobilitazione del passato riguardanti o la stessa frana, quando sia ipotizzabile la stazionarietà del fenomeno, o versanti limitrofi con eguali caratteristiche geomorfologiche e litologiche, nel caso di fenomeni che non appaiono ripetitivi.

Rimandando per i dettagli ai lavori pubblicati sull'argomento (Sirangelo e Versace, 1996; Versace et al. 2000), è da osservare che, grazie alla possibilità di utilizzare funzioni di trasferimento diverse, il modello FLaIR appare sufficientemente flessibile da risultare adattabile a diverse tipologie di frana.

La figura 19 riporta i risultati dell'applicazione al caso della frana di Costigliole d'Asti in Piemonte. Si nota come le piogge giornaliere trasformate attraverso la funzione di trasferimento identifichino i primi cinque casi critici proprio in corrispondenza di cinque eventi di mobilitazione del corpo franoso.

Come tutti i modelli di questo tipo, il FLaIR trova la sua applicazione ottimale nei sistemi di preannuncio, eventualmente accoppiato con un modulo di previsione delle piogge (Sirangelo e Versace, 2002). Tra le applicazioni più interessanti: l'uso operativo per la gestione dell'emergenza Sarno (Versace et al., 1998), e l'inserimento, in via sperimentale, nel sistema di previsione e monitoraggio ambientale della Regione Piemonte, in coppia con un modello meteorologico di previsione delle piogge (Capparelli et al., 2004; Tiranti et al., 2004; Bosco et al., 2005).

Con il FLaIR si possono adottare anche tecniche di regionalizzazione per trasferire i risultati ottenuti nei casi in cui si dispone dei dati necessari per la taratura del modello ai casi in cui tali dati mancano del tutto, sulla base di analogie tra i diversi fenomeni (Sirangelo et al., 2003). Si supera in tal modo il limite rappresentato dalla necessità di avere dati sufficienti per identificare la funzione di trasferimento e stimare i parametri, anche se a prezzo, ovviamente, di una maggiore incertezza.

I modelli idrologici forniscono, comunque, solo una valutazione di prima approssimazione degli effetti che le piogge producono sulla stabilità dei versanti e sono da utilizzare solo quando l'informazione disponibile è molto limitata. Se le informazioni sulle caratteristiche del pendio risultano più dettagliate sono preferibili i modelli completi di versante.

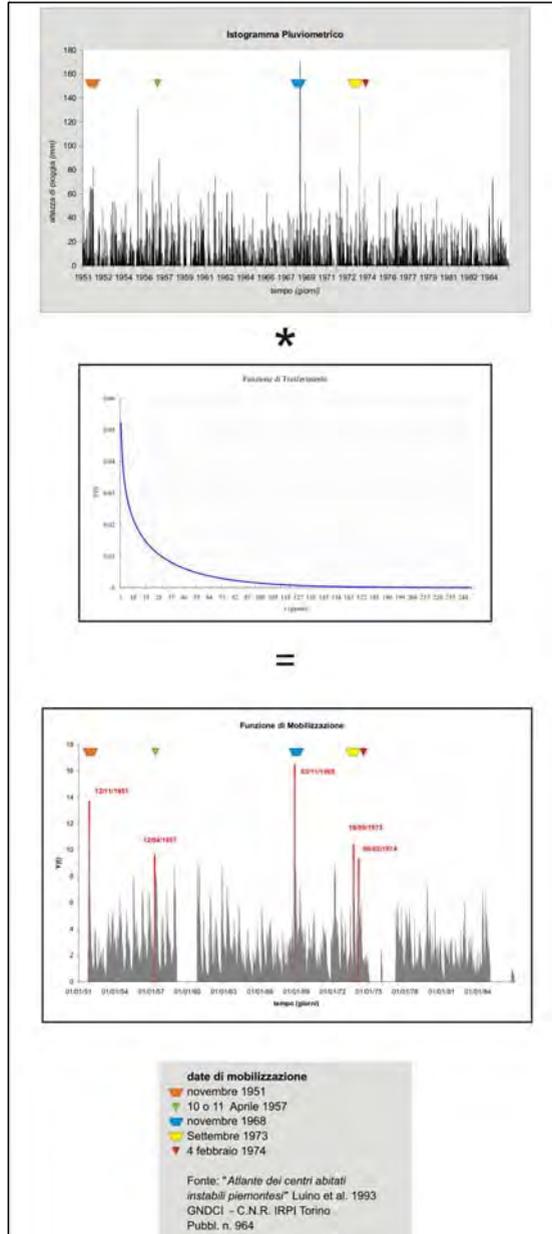


Figura 19. L'istogramma delle piogge giornaliere spiega solo alcuni dei cinque eventi franosi verificatisi a Costigliole d'Asti dal 1951 al 1994. Se, invece, si utilizza il modello FLAIR, e in particolare una funzione di trasferimento di tipo esponenziale decrescente, si ottiene una funzione di mobilitazione che attinge i massimi valori in date compatibili con gli spostamenti della frana.

Questi ultimi sono composti da:

- un modulo idrologico-idraulico finalizzato alla identificazione dei contenuti idrici e delle pressioni neutre che si determinano nella zona non satura e in quella satura, sulla base delle caratteristiche delle piogge, della morfologia e dell'idraulica del suolo;
- un modulo geotecnico che sulla base delle caratteristiche meccaniche dei suoli e dell'informazione derivante dal modulo idrologico-idraulico è in grado di valutare il grado di stabilità del versante.

Anche per questo tipo di modelli la letteratura è piena di proposte, che differiscono soprattutto per il livello di accuratezza con il quale si descrivono i vari fenomeni.

Tra i modelli più diffusi anche se più elementari, si possono citare: dSLAM (Wu e Sidle, 1993); SHALSTAB (SHALLOW Landslide STABILITY model - Montgomery e Dietrich, 1994); SINMAP (Stability INDEX MAPPING - Pack et al., 1998); PISA (Probabilistic Infinite Slope Analysis - Hammond et al., 1992; Haneberg Geosciences, 2001). Il modulo idrologico è costituito da componenti di modelli proposti per la simulazione afflussi-deflussi: il modello di O'Loughlin (1986), il TOPOG di Vertessy et al. (1994), il TOPMODEL di Beven e Kirkby (1979), e altri ancora. In ogni caso si assume una circolazione idrica sotterranea in condizioni stazionarie e controllata dalla topografia superficiale.

I parametri geotecnici necessari sono assunti costanti sull'intero pendio o variabili casualmente in campi di variazione predefiniti. I risultati sono espressi in termini di fattore di sicurezza o di probabilità di rottura dei versanti o attraverso un indice di stabilità o, come nel caso dello SHALSTAB, in forma indiretta determinando un valore di precipitazione necessario all'innescio della frana.

A titolo di esempio si riporta in Figura 20 il risultato del modello SHALSTAB applicato al caso di un tratto di versante del Pizzo di Alvano (Calcaterra et al, 2003), interessato dalle colate di fango che nel maggio 1998 hanno devastato Sarno e altri comuni della Campania. Il modello si basa su due equazioni semplici derivanti una

dall'assunzione di pendio indefinito, l'altra dalla modellazione idrologica secondo O'Loughlin (1986):

$$w_l = \frac{h}{z} = \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right) \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (8)$$

$$w = \frac{qa}{bT \sin \theta} \quad (9)$$

in cui è:

θ la pendenza locale del pendio

φ l'angolo di attrito del terreno

ρ_s e ρ_w le densità del terreno e dell'acqua

q la pioggia netta in ingresso nel terreno per unità di superficie

a l'area contribuyente della cella elementare

b la larghezza della cella elementare

T la trasmittività a saturazione, assunta costante

w_l il contenuto d'acqua limite per la stabilità

w il contenuto d'acqua effettivo.

Dal confronto tra w e w_l si ricava il valore limite dell'indice q/T che può rendere instabile il pendio. La figura evidenzia le aree caratterizzate da diverse classi di valori del rapporto limite q/T (in campo logaritmico), e quindi aventi un diverso livello di suscettibilità al franamento. Più basso il valore dell'indice maggiore è la propensione al dissesto.

I limiti di modelli di questo tipo sono evidenti.

La schematizzazione dei fenomeni è eccessiva. Ma soprattutto appare contraddittorio l'uso congiunto del pendio indefinito, adatto a descrivere fenomeni sostanzialmente superficiali, e di moduli idrologici che trascurano i fenomeni transitori e le condizioni dello strato non saturo che, invece, hanno una straordinaria rilevanza proprio nei movimenti corticali.

Più in generale la modellazione dei fenomeni che avvengono nella zona non satura appare indispensabile, perché consente di tener conto del fatto che in tale zona la variazione di pressione si manifesta in maniera più rapida rispetto al movimento del fronte di umidificazione, causando rapide variazioni nella conducibilità idraulica e quindi nell'intero regime delle pressioni interstiziali e in ultima analisi sulla stabilità del pendio.

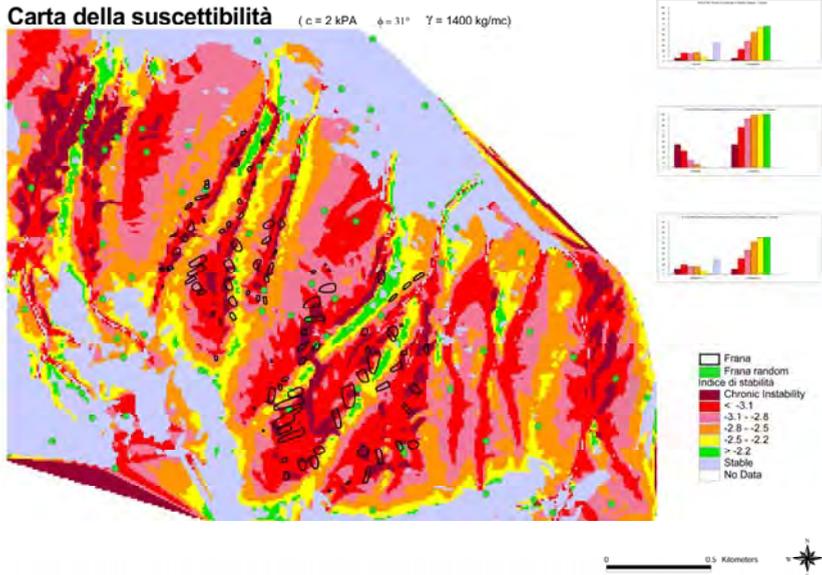


Figura 20. Carta della suscettibilità ai movimenti franosi ottenuti con il modello SHALSTAB, per il territorio di Quindici in Campania. La colorazione delle aree indica diverse classi dei valori del rapporto q/T , in campo logaritmico, tra la massima pioggia netta ammissibile per unità di superficie q e la trasmissività a saturazione del suolo T (da De Riso et al., 2005).

Un approccio più avanzato e che va in questa direzione è dovuto ad Iverson (2000) che analizza il transitorio nel processo di infiltrazione, individuando due scale temporali caratteristiche del trasferimento delle pressioni. La prima è data da A/D_0 (in cui A è l'area totale drenante nel punto considerato e D_0 rappresenta la diffusività massima in condizioni sature) e definisce il minimo tempo necessario perché in un punto del pendio si risenta dell'effetto di trasmissione laterale delle pressioni provenienti da A . La seconda scala temporale H^2/D_0 rappresenta, invece, il tempo minimo di trasmissione delle pressioni in direzione normale al versante fino ad una profondità H . Il rapporto tra queste due quantità determina un fattore $\varepsilon = H/\sqrt{A}$ che caratterizza la risposta del versante in termini di distribuzione delle pressioni. In particolare per il caso $\varepsilon \ll 1$, quando cioè le sollecitazioni verticali sono nettamente prevalenti rispetto a quelle laterali, Iverson deriva, alle scale temporali di riferimento, due espressioni semplificate dell'equazione di Richards. Queste descrivono, rispettivamente in condizioni stazionarie e nel transitorio, la distribuzione delle pressioni nel mezzo non saturo. Per il comportamento nel transitorio si individua una funzione di risposta, che, a partire da una

condizione iniziale di distribuzione idrostatica delle pressioni, tipica delle condizioni stazionarie, consente di determinarne la distribuzione delle pressioni conseguente ad eventi meteorici di intensità variabile. La stima si effettua attraverso un integrale di convoluzione, così come rappresentato nella Figura 21.

Per tener conto delle pressioni neutre negative, Iverson in accordo con Fredlund et al. (1978) introduce nel modulo geotecnico la cosiddetta coesione apparente, ottenendo per il fattore di sicurezza la seguente espressione:

$$FS = \frac{c}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{\psi(Z, t) \tan \phi}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (10)$$

avendo indicato con

α l'inclinazione del pendio

ϕ l'angolo di attrito del terreno

c la coesione del terreno

$\psi(Z, t)$ la pressione al tempo t e alla quota Z

γ_s e γ_w i pesi specifici del terreno e dell'acqua.

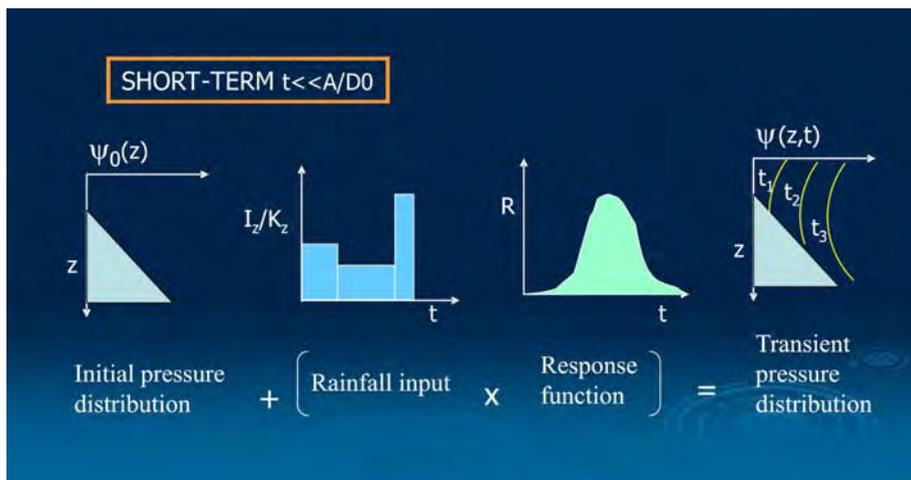


Figura 21. Nel modello di Iverson l'andamento, in fase transitoria (short-term) della pressione ψ , al variare della profondità z e del tempo t , è legata all'andamento idrostatico iniziale e alla convoluzione tra l'input pluviometrico e una funzione di risposta del suolo ottenuta dall'autore a partire dall'equazione di Richards.

L'uso combinato dei due moduli fornisce risultati del tipo di quelli riportati in Figura 22.

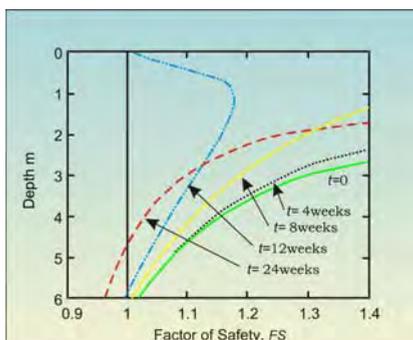


Figura 22. Il fattore di sicurezza FS calcolato con la (10) risente della variazione della pressione ψ al tempo t e alla quota z . In figura, l'andamento di FS nel caso della frana di Minor Creek – California. (da Iverson, 2000)

Il miglioramento introdotto con il modello di Iverson appare notevole anche se le numerose semplificazioni introdotte nell'integrare l'equazione di Richards nuocciono alla generalità del modello e lo schema del pendio indefinito continua ad apparire inadeguato.

È necessario, perciò, andare avanti su questa strada puntando sullo sviluppo integrato di moduli

idrologici e geotecnici più accurati nella descrizione dei fenomeni.

Più in generale è interessante osservare che la modellazione dei fenomeni di instabilità dei versanti indotta da fenomeni idrologici ripercorre, con qualche anno di ritardo, la strada già seguita per l'analisi della formazione del deflusso superficiale. I modelli completi di versante, con il loro approccio fisicamente basato appaiono, infatti, del tutto analoghi ai modelli di simulazione del ciclo idrologico trattati nella prima parte di questa relazione.

Non è quindi difficile prevedere che i modelli di versante avranno un considerevole sviluppo e che, anche per essi, si dovrà discutere di validazione e di incertezza e si potrà discutere sulla ricerca del modello perfetto. Per questi motivi, il ruolo che gli idrologi italiani potranno avere in questo settore appare davvero rilevante, come testimoniano i contributi scientifici già prodotti in questi anni, e, da ultimo, anche in occasione di questo Convegno.

Previsione delle piogge

In molti casi applicativi è essenziale conoscere con un certo anticipo l'evoluzione che potrà avere nell'immediato futuro il fenomeno di interesse, si tratti di deflussi superficiali o di manifestazioni di instabilità di un pendio.

Questa conoscenza anticipata è rilevante nei processi decisionali la cui efficacia dipende strettamente dal tempo di risposta. Esempio tipico, ma non esclusivo, sono gli interventi di protezione civile in fase di emergenza.

In questi casi, quando il fenomeno di interesse risponde alla sollecitazione pluviometrica lentamente, o in tempi comunque compatibili con le azioni da attuare, può risultare sufficiente l'informazione sulle piogge cadute fino a quel momento, acquisibili con le normali tecniche di telemisura. Tali piogge inserite nel modello di simulazione consentono di ottenere la previsione richiesta.

Se, invece, il tempo di risposta del fenomeno investigato è più breve del tempo occorrente per l'intervento, si deve ampliare l'orizzonte temporale della previsione, prevedendo con il necessario anticipo le piogge che cadranno, e che dovranno essere inserite nel modello di simulazione.

La previsione delle piogge può essere ottenuta ricorrendo a modelli meteorologici che cercano di simulare, per i giorni successivi, l'evoluzione dei vari parametri fisici caratterizzanti l'atmosfera.

La diffusione e la specializzazione di questi modelli sono in costante crescita. In particolare i LAM (Limited Area Models) ad alta risoluzione sono in grado di fornire previsioni sulle altezze di pioggia ad una risoluzione spaziale di 5-10 km, con una risoluzione temporale di 1-3 ore, e un orizzonte temporale che può estendersi alle 72 ore. Sono passi notevoli se si pensa alla scala di risoluzione dei GCM (Global Circulation Models) caratterizzati da una risoluzione spaziale di 40-80 km e una risoluzione temporale di 6-12 ore.

Molti sono i LAM operativi in Italia: il LAMI, in Emilia Romagna, presso l'ARPA-SMR (che ha sostituito il vecchio LAMBO), il RAMS, in Toscana, presso il LaMMA, il MM5, in Abruzzo, presso il CETEMPS, e in Calabria, presso il CRATI s.c.r.l., il BOLAM, in Toscana, presso il CNR ISAC e il DIFI, il LILAM, in Liguria presso l'ARPAL. È facile prevedere che molti altri modelli con risoluzione sempre maggiore saranno adottati e si svilupperanno nei prossimi anni.

Tuttavia essi appaiono ancora lontani dal fornire previsioni sufficientemente precise alla piccola scala spaziale, dal prevedere cioè le piogge puntuali. È questa la scala di interesse per i bacini idrografici piccolissimi, potenzialmente interessati da piene repentine, e per i versanti soggetti a frane superficiali, che rispondono anch'esse in tempi molto brevi alle sollecitazioni pluviometriche. E, quindi, i modelli meteorologici finiscono per fornire risultati molto incerti proprio in alcuni dei casi in

cui la previsione delle piogge potrebbe risultare decisiva.

In simili circostanze la disponibilità di serie storiche di precipitazioni puntuali, sufficientemente lunghe, con passo temporale piccolo, misurate in pluviometri molto vicini al punto di interesse può rendere competitivo il ricorso a modelli di tipo stocastico.

E, invero, la letteratura è ricca di proposte di modelli di previsione delle piogge puntuali che mirano ad identificare, in base ai dati del passato, la struttura del processo delle precipitazioni, in modo da poter simulare, in termini probabilistici e con tecniche di tipo Montecarlo, le precipitazioni future.

Una prima categoria di modelli stocastici è riconducibile all'analisi delle serie temporali. Questi modelli non cercano di rappresentare il fenomeno indagato, ma si limitano ad analizzare e descrivere, in senso statistico, le serie storiche costituite dalle precipitazioni aggregate in intervalli temporali, fissati a seconda del fenomeno da prevedere. Nel caso di frane corticali o di piene repentine, ad esempio, la scala da adottare è oraria o sub oraria.

A questa categoria sono riconducibili i classici modelli ARMA (Box e Jenkins, 1976) applicabili a processi Gaussiani, i GAR (Lawrance e Lewis, 1981, Fernandez e Salas, 1990) nel caso di processi non Gaussiani e i Product Model (Jacobs e Lewis, 1978) adatti a modellare i processi intermittenti.

Accanto a questi modelli adatti per processi stazionari, si è sviluppata la modellistica dei processi non stazionari che comprende essenzialmente i modelli PARMA (Salas et al., 1980), GAR periodici (Fernandez e Salas, 1986), Product Model periodici (Salas e Chebaane, 1990; Chebaane et al., 1995), e ARIMA (Bras e Rodriguez-Iturbe, 1984).

Questi modelli hanno il limite di prescindere dall'informazione legata alla natura del fenomeno indagato, rivolgendo tutta la loro attenzione solo ai dati disponibile. Modelli di questo tipo sono, perciò, indicati anche come *driven data*.

La seconda categoria di modelli stocastici di precipitazione è quella dei processi puntuali marcati che, al contrario, cercano di riprodurre, sia pure in modo molto schematico, le principali caratteristiche del processo delle precipitazioni. Essi si basano sull'integrazione di due componenti: il processo puntuale degli arrivi delle precipitazioni che consente di individuare i punti dell'asse temporale nei quali si ha il passaggio da un'intensità di pioggia nulla a una non nulla; e un mark associato ad ogni arrivo che definisce la durata, l'intensità e la forma della precipitazione. In questo schema generale si costruiscono diversi tipi di processi stocastici, legati

soprattutto alla modellazione del mark. Si possono, infatti, adottare schemi semplici del tipo impulso istantaneo o andamenti più flessibili, assegnando ai singoli mark andamenti particolari: rettangolare, oppure triangolare, o Beta, o altri ancora.

Una schematizzazione più articolata del fenomeno consiste nell'ipotizzare che il processo degli arrivi si basi su due livelli. Il primo descrive l'arrivo delle perturbazioni (o storms). Il secondo riguarda l'arrivo dei singoli scrosci (o bursts) che si susseguono all'interno di ciascuno storm. Ad ogni burst viene poi associato un mark di forma assegnata. Operando in tal modo, la forma complessiva della precipitazione per ogni storm sarà costituita dalla sovrapposizione dei marks associati ai singoli burst. Appartengono a questo gruppo i modelli Neyman-Scott (Kavvas e Delleur, 1981) e Bartlett-Lewis (Rodriguez-Iturbe et al., 1987).

Il limite principale dei processi puntuali marcati deriva dal fatto che, nella maggior parte dei casi, non sono note le intensità di pioggia nel continuo temporale. Pertanto, la stima dei parametri deve essere effettuata in base alle statistiche delle altezze di pioggia cumulate in intervalli temporali, di dimensione compatibile con quella di campionamento dei dati sperimentali. La stima dei parametri del modello, tuttavia, risente fortemente dell'intervallo di aggregazione utilizzato (Kavvas e Delleur, 1981, Rodriguez-Iturbe et al., 1984) ed è quindi problematico effettuare previsioni per intervalli di aggregazione diversi da quelli utilizzati in fase di taratura. Questi problemi divengono irrilevanti se le serie storiche osservate sono ad elevata risoluzione temporale (Sirangelo e Iiritano, 1997).

Un modello costruito proprio per la previsione delle piogge puntuali è il PRAISE (Prediction of Rainfall Amount Inside Storm Events - Sirangelo e Versace, 2002). È un modello riconducibile al primo dei due gruppi considerati e ipotizza un processo stazionario in senso lato a parametro discreto.

Il modello mette in relazione la pioggia H_{i+1} nell'intervallo futuro discreto $i+1$, con la variabile casuale $Z_i^{(v)}$, funzione di v altezze di pioggia antecedente $H_{i-v+1}, \dots, H_{i-1}, H_i$, e tale che la sua

dipendenza stocastica con la variabile H_{i+1} descriva l'intera struttura correlativa del processo discretizzato delle precipitazioni (Figura 23).

La variabile $Z_i^{(v)}$ è identificata se si individua, in base all'andamento del coefficiente di autocorrelazione parziale, l'estensione della memoria del processo v , e se si definisce la forma della dipendenza dalle $H_{i-v+1}, \dots, H_{i-1}, H_i$. Nel caso più semplice si può assumere una funzione lineare, mentre v risulta dell'ordine delle 6-10 ore.

Identificata la $Z_i^{(v)}$ il problema si riduce all'identificazione della distribuzione di probabilità congiunta delle variabili casuali $Z_i^{(v)}$ e H_{i+1} . Entrambe le variabili sono di tipo misto, non negative, con probabilità finita in corrispondenza del valore nullo e probabilità infinitesima nel caso di valori non nulli. Pertanto anche la densità di probabilità congiunta avrà natura mista. I quattro eventi possibili sono:

- a) $H_{i+1} = 0 \cap Z_i^{(v)} = 0$ non è piovuto e non pioverà
- b) $H_{i+1} > 0 \cap Z_i^{(v)} = 0$ non è piovuto e pioverà
- c) $H_{i+1} = 0 \cap Z_i^{(v)} > 0$ è piovuto e non pioverà
- d) $H_{i+1} > 0 \cap Z_i^{(v)} > 0$ è piovuto e pioverà.

L'evento a) ha probabilità finita. Per la distribuzione marginale degli eventi b) e c) il PRAISE utilizza la distribuzione Weibull, mentre per l'evento d) utilizza la distribuzione bivariata Weibull-Bessel.

Combinando con gli opportuni pesi le quattro distribuzioni si ottiene la densità di probabilità congiunta tra $Z_i^{(v)}$ e H_{i+1} . Da questa può derivarsi facilmente la distribuzione condizionata di H_{i+1} dato $Z_i^{(v)}$, da utilizzare in sede di previsione, per ricostruire, con tecniche Montecarlo, la distribuzione di probabilità della variabile H_{i+1} , una volta calcolato $Z_i^{(v)}$ in base alle piogge misurate negli ultimi v intervalli.

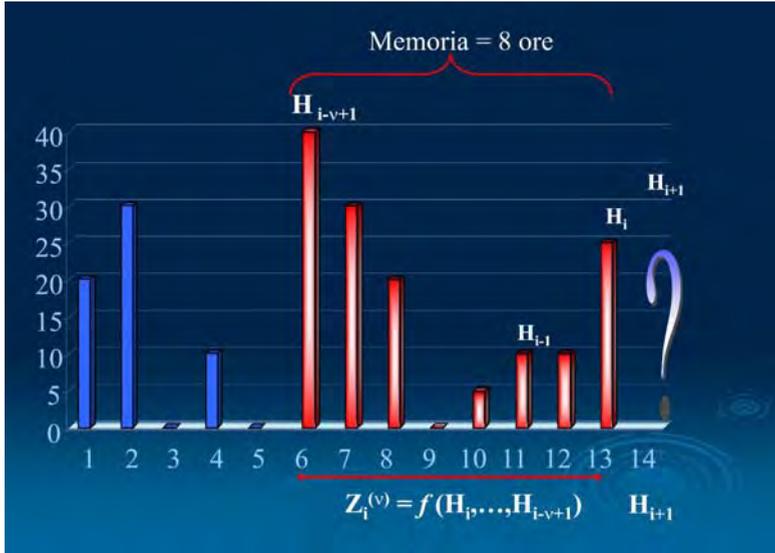


Figura 23. Con il modello stocastico PRAISE la pioggia nell'intervallo successivo H_{i+1} può essere prevista nota una variabile $Z_i^{(v)}$ funzione delle piogge fino all'intervallo i -esimo e nota la distribuzione di probabilità congiunta di H_{i+1} e di $Z_i^{(v)}$.

La procedura può essere estesa anche agli intervalli successivi $i+1+j$, con $j=1, 2, \dots$. La differenza è che in tal caso la stima non si baserà su un unico valore di $Z_{i+j}^{(v)}$, ma su una sua distribuzione di probabilità, che tiene conto della distribuzione di probabilità delle piogge previste per gli intervalli successivi all' i -esimo.

I risultati soddisfacenti ottenuti in alcune applicazioni del PRAISE mostrano che la previsione stocastica delle piogge puntuali è molto interessante e può costituire una valida alternativa alla previsione meteorologica, anche perché, al contrario di quest'ultima, è una previsione mirata, nel senso che è espressamente costruita per il punto (versante o piccolo bacino) di interesse e perché conserva la memoria degli eventi del passato, oltre che delle piogge appena cadute.

Tuttavia, la previsione stocastica non è in grado di utilizzare l'informazione fornita dai modelli atmosferici e offre perciò lo stesso risultato sia che i modelli meteorologici prevedano piogge intense sia che prevedano bel tempo.

Appare perciò ragionevole combinare le due previsioni in un unico stimatore di tipo bayesiano.



Figura 24. L'uso combinato di un previsore stocastico, tipo PRAISE, in grado di fornire una stima della funzione di densità di probabilità *a priori* della pioggia futura, e di un previsore meteo consente di ottenere, attraverso un'opportuna funzione di verosimiglianza, la stima della funzione di densità *a posteriori*, e di tener conto in modo integrato di entrambe le informazioni

In particolare utilizzando il modello PRAISE conviene fare riferimento alle variabili H_{i+2} e $Z_{i+1}^{(v)}$ e quindi a una previsione che non riguarda l'intervallo immediatamente successivo a quello attuale.

Se si usa solo il PRAISE, ignorando del tutto l'informazione meteo, la densità di probabilità della variabile $Z_{i+1}^{(v)}$ potrà essere determinata in base:

- alle piogge misurate fino all'intervallo i -esimo, che sono note,
- alla pioggia H_{i+1} nell'intervallo $i+1$, che è una variabile casuale la cui densità di probabilità è stimata con il modello PRAISE.

Si ottiene in tal modo una distribuzione a priori in senso bayesiano della variabile $Z_{i+1}^{(v)}$.

Per costruire la funzione di verosimiglianza è necessario disporre di una serie sufficientemente lunga di coppie di osservazioni costituite dalle altezze di precipitazione previste dal modello meteo e dalle altezze di precipitazione effettivamente misurate (Krzysztofowicz, 1999). Le coppie di dati devono ovviamente riferirsi allo stesso intervallo di tempo. Sulla base di tali dati, opportunamente rielaborati, può costruirsi la funzione di verosimiglianza che fornisce la distribuzione di probabilità della previsione meteo condizionata dalla previsione stocastica.

Moltiplicando la distribuzione a priori e la funzione di verosimiglianza, e riscaldando in modo opportuno, si ottiene la densità di probabilità a posteriori in senso bayesiano della $Z_{i+1}^{(v)}$.

Tale densità di probabilità inserita nel modello PRAISE consente di ottenere, con simulazioni numeriche, la distribuzione di probabilità della pioggia H_{i+2} .

La procedura può essere estesa con appropriate modalità anche agli intervalli temporali successivi a $i+2$.

Un'applicazione di questo approccio integrato è stata realizzata, a scala oraria, per le piogge di Cosenza avendo come previsore meteo il modello MM5 (De Luca, 2005).

Il ricorso a stimatori bayesiani che uniscano la previsione meteo e quella puramente stocastica appare, in definitiva,

attraente per almeno due ordini di motivi. In primo luogo perché si mettono insieme l'informazione, specifica e puntuale, legata alle piogge già cadute e l'informazione, spazialmente mediata, sulle piogge future. In secondo luogo perché, come per tutti gli stimatori effettivamente bayesiani, si favorisce l'autoapprendimento del sistema. In effetti, aumentando il periodo di osservazione per il quale si possono raffrontare le previsioni meteorologiche e le piogge misurate, si ottengono funzioni di verosimiglianza sempre più capaci di descrivere il giusto peso da attribuire alla previsione stocastica e a quella meteorologica.

Anche se più complesso un discorso analogo può essere sviluppato anche a scala areale, utilizzando modelli stocastici di previsione spazio temporale e integrandoli con modelli di previsione meteo.

Guardando avanti

Come era prevedibile, è stato possibile trattare, peraltro in modo schematico e semplificato, solo alcune delle tante questioni che gli strumenti tecnici e scientifici dell'Idrologia consentono già oggi di affrontare.

I temi richiamati sono però sufficienti a delineare uno scenario abbastanza verosimile per il prossimo futuro.

Ci sarà certamente uno sviluppo impetuoso della modellistica fisicamente basata, che vorrà descrivere in modo sempre più preciso e dettagliato i vari aspetti del fenomeno naturale. Ma questo sviluppo diventerà semplice manierismo, se non si accompagnerà ad una crescita, altrettanto poderosa, sia della sperimentazione alle varie scale e con le tecniche più appropriate, sia della capacità di selezionare i modelli, definendo criteri e procedure di misura dell'incertezza e di validazione. Procedure e criteri che dovranno essere oggettivi e condivisi.

Ci sarà anche un grande sviluppo della modellistica integrata che sempre più cercherà di ricondurre ad unità processi finora analizzati in modo disgiunto e in fasi successive. È il caso della separazione, alla scala sinottica, tra modelli idrologici e modelli di circolazione dell'atmosfera. È il caso della separazione, alla scala di versante, tra modelli idrologico-idraulici e modelli geotecnici. È il caso della separazione, alla scala di bacino, tra modelli idrologici e modelli idraulici. È il caso della separazione tra quantità e qualità, tra idrologia e ecologia, e così via.

Modelli complessi da sviluppare in modo interdisciplinare, con gruppi di lavoro ampi e

Pasquale Versace

compositi, capaci di utilizzare al meglio anche le opportunità offerte dalla tecnologia.

C'è un lungo cammino da percorrere. Ma l'Idrologia italiana, restando strettamente incardinata nella comunità idraulica nazionale, saprà raccogliere la sfida e mantenere il ruolo di protagonista che si è meritatamente conquistato.

Questo lavoro è in larga misura frutto della preziosa e amichevole collaborazione di Beniamino Sirangelo, Giovanna Capparelli, Davide De Luca, Donatella Maletta e, soprattutto, di Daniela Biondi. Alla preparazione delle figure e all'impaginazione del testo ha collaborato Francesco Cruscomagno, anche avvalendosi del materiale predisposto, in occasione della presentazione al Convegno, da Luciano Marini e Francesco Di Giuseppe, che avevano curato anche le animazioni e i filmati.

Bibliografia

- M. B. Abbott, J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, e J. Rasmussen. An introduction to the European Hydrologic System - Systeme Hydrologique Europeen, SHE, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87:45-59, 1986.
- M. P. Anderson, e W. W. Woessner. The role of the postaudit in model validation. *Advanced in Water Resources*, 15:167-173, 1992.
- J. C. Bathurst, J. M. Wicks, e P. E. O'Connell. Chapter 16: The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modeling system. In V. P. Singh, editor, *Computer models of watershed hydrology*, pages 563-594. Water Resources Publications, 1995.
- R. P. Betson. What is watershed runoff?. *Journal of Geophysical Research*, 69:1541-1552, 1964.
- K. Beven. Changing ideas in hydrology: the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 157-171, 1989.
- K. Beven. A discussion of distributed modelling. In Refsgaard and Abbott, editors, *Distributed Hydrological Modelling*, pages 255-278. Kluwer, Dordrecht, 1996.
- K. Beven. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Wiley and Sons, 2000.
- K. Beven. How far can we go in distributed hydrological modelling?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1):1-12, 2001.
- K. Beven. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. *Hydrological Processes*, 16:189-206, 2002.
- K. J. Beven, e A. M. Byrley. The Future of Distributed Models: Model Calibration and Predictive Uncertainty. *Hydrological Processes*, 6:279-298, 1992.
- K. J. Beven, e J. Freer. Equifinality, data assimilation and uncertainty estimation in mechanistic modelling of environmental systems using GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249:11-29, 2001.
- K. Beven, e P. German. Macropores and water ow in soils. *Water Resources Research*, 18: 1311-1325, 1982.
- K. J. Beven, e M. J. Kirkby. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1):43-69, 1979.
- D. Biondi. Sviluppo, taratura e validazione dei modelli di trasformazione afflussi-deflussi. Tesi di dottorato in Ingegneria Idraulica per l'Ambiente e il Territorio, Cosenza, 2004.
- Ch. Bonnard, e F. Noverraz. Influence of climate change on large landslides: assessment of long term movements and trends. *Proc. of the International Conference on Landslides: causes impact and countermeasures*, Gluckauf, Essen, Davos, 121-138, 2001.
- F. Bosco, S. Campus, L. Mensio, G. Nicolò, e D. Tiranti. La previsione delle Frane in AAVV Dalla valutazione alla previsione dei rischi naturali, Torino, Arpa 2005, pp 196-214, 2005.
- G. E. P. Box e G. M. Jenkins. *Time series analysis: forecasting and control*. Holden-Day, S.Francisco, 1976.
- E. W. Brand, J., Premchitt, e H. B. Phillipson. Relationship between rainfall and landslides in

- Hong Kong. Proc. of the IV International Symposium on Landslides, Toronto, vol. 1, 377–384, 1984.
- R. L. Bras e I. Rodriguez-Iturbe. *Random function and hydrology*. Dover Publications., 1984.
- P. J. Brockwell, e R. A. Davis. *Time series: theory and method, second edition*, Springer & Verlag, New York, 1987.
- A. Bronstert. Capabilities and limitations of detailed hillslope hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 13:21-48, 1999.
- N. Caine. The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flows. *Geogr. Ann.*, 62, 23–27, 1980.
- D. Calcaterra, R. De Riso, e A. Santo. Landslide hazard and risk mapping: experiences from Campania, Italy. Proc. Intern. Conf. on Fast Slope Movements: Prediction and Prevention for Risk Mitigation, vol. 1: 63-70, 2003.
- A. Calver, e W. L. Wood. Chapter 17: the Institute of Hydrology distributed Model. In V.P. Singh, editor, *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publication, Littleton, Colo., 1995.
- R. K. Campbell.. Soil Slips, Debris Flows and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California. *U.S. Geol. Surv.*, Professional Paper, 851, 1975.
- A. Cancelli, e R. Nova. Landslides in soil debris cover triggered by rainstorm in Valtellina (Central Alps, Italy). Proc. of the IV International Conference on Landslides, Tokyo, vol. 1, 1985.
- S. H. Cannon, e S. D. Ellen. Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California. *Geology*, 38 (12), 267– 272, 1985.
- G. Capparelli, B. Sirangelo e P. Versace. Realizzazione di un sistema di preannuncio delle frane innescate da pioggia. *Atti del I Workshop Modeci, Modelli Matematici per la simulazione di Catastrofi Idrogeologiche*, pp. 315-327, Cosenza, 2004.
- L. Cascini e P. Versace. Eventi pluviometrici e movimenti franosi. *Atti del XVI Convegno Nazionale di Geotecnica*, Bologna, 171-184, 1986.
- M. Chebaane., J. D. Salas e D. C. Boes. Product Periodic Autoregressive Processes for Modeling Intermittent Monthly Streamflows. *Water Resour.Res.*, 32(5): 1513-1518, 1995
- M. Civita. Studio delle condizioni di stabilità dei terreni nella Penisola Sorrentina (Campania). *Geologia Applicata all'Ingegneria*, vol. X, parte I, 1975.
- N. H. Crawford, e R. K. Linsley. Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV. Tech. Rep. No. 39, Stanford Univ., Palo Alto, Calif., 1966.
- J. Corominas, e J. Moya. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat river basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30, 79– 93, 1999.
- G. Crosta. Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environmental Geology*, 35 (2– 3), 131– 145, 1998.
- M. J. Crozier. Prediction of rainfall triggered landslides: a test of the antecedent water status model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 825–833, 1999.
- B. D'Elia. Aspetti meccanici nelle frane tipo colata. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 9, 1975.
- B. D'Elia. Caratteri climatici delle colate: interventi di stabilizzazione. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 13, 1979.
- D. L. De Luca. Metodi di previsione dei campi di pioggia. Dissertazione per il conseguimento del titolo di dottore di ricerca. Università della Calabria, Cosenza, 2005.
- G. De Marsily, P. Combes, e P. Goblet. Comment on “Ground-water models cannot be validated” by L.F. Konikow and J.D. Bredehoeft. *Advances in Water Resources*, 15:367-369, 1992.
- R. De Riso, D. Calcaterra, F. De Luca Tuppiti Schinosa, e D. De Martire. Valutazione della suscettibilità all'innescio di frane per scorrimento-colata nei depositi piroclastici campani mediante modelli su base fisica. Rapporto tecnico non pubblicato, Napoli, 1-43, 2005.
- J. C. Dooge. A general theory of unit hydrograph. *Journal of Geophysical Research*, 64(2):241-256, 1959.

Pasquale Versace

- T. Dunne, e R. D. Black. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 6:478-490, 1970.
- T. Dunne, T. R. Moore, e C. H. Taylor. Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. *Hydrological Sciences Bulletin*, 20(3):305-327, 1975.
- B. Fernandez e J. D. Salas. Periodic Gamma Autoregressive Processes for Operational Hydrology. *Water Resour. Res.*, 22(10): 1385-1396, 1986
- B. Fernandez e J. D. Salas. Gamma-Autoregressive Models for Streamflow Simulation. *J. Hydraul. Eng.*, 116(11): 1403-1414, 1990.
- P. Flentje, R. N. Chowdhury, e P. Tobin. Management of landslides triggered by a major storm event in Wollongong, Australia. *Proc. of the II International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment*, Taipei, 479– 487, 2000.
- S. W. Franks, P. Gineste, K. J. Beven, e P. Merot. On constraining the predictions of a distributed model: The incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process. *Water Resources Research*, 34:787-797, 1998.
- D. G. Fredlund, N. R. Morgenstern e R. A. Widger. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3): 313-321, 1978.
- J. Freer, K. J. Beven, e B. Ambrose. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach. *Water Resources Research*, 32(7):2161-2173, 1996.
- R. A. Freeze, e R. L. Harlan. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*, 9:237-258, 1969.
- M. Govi , G. Mortara e P. F. Sorzana. Eventi idrogeologici e frane. *Geologia Applicata all'Ingegneria*, vol. XVII, n. 3, 1984.
- R. B. Grayson, e G. Blöschl, *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modeling*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- R. B. Grayson, I. D. Moore, e T.A. McMahon. Physically Based Hydrologic Modeling 1. A Terrain-Based Model for Investigative Purposes. *Water Resources Research*, 28(10): 2639-2658, 1992a.
- R. B. Grayson, I. D. Moore, e T.A. McMahon. Physically Based Hydrologic Modeling 2. Is the Concept Realistic?. *Water Resources Research*, 28(10):2659-2666, 1992b.
- H. Gupta, M. Thiemann, M. Trosset, e S. Sorooshian. Reply to comment by K. Beven and P. Young on "Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models". *Water Resources Research*, 39(5):1117, 2003.
- C. Hammond, D. Hall, S. Miller, e P. Swetik. Level I stability analysis (LISA) documentation for version 2.0, Gen. Tech. Rep. INT-285, For Serv. U.S. Dep. of Agric., Ogden, Utah, 1992.
- W. C. Haneberg. A rational probabilistic method for spatially distributed landslide hazard assessment: Sottoposto a Environmental & Engineering Geoscience.
- J. M. H. Hendrickx , e M. Flury. Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone. In *Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone*. National Academy Press, Washington D.C., 149-187, 2001
- R. E. Horton. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, 14:446-460, 1933.
- R. Iverson. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research* 36(7), 2000.
- P. Jacobs e P. A.W. Lewis. Discrete Time Series Generated by Mixture – 3. Autoregressive Process (DAR(P)). *Tech. Rep. NPS 55-78-022*, Naval Postgraduate School, Monterey, CA., 1978
- M. L. Kavvas e J. W. Delleur. A stochastic cluster model of daily rainfall sequences. *Water Resour. Res.*, 17 (4): 1151-1160, 1981.
- D. K. Keefer, R. C. Wilson, R. K. Mark, E. E. Brabb, W. M. Brown III, S. D. Ellen, E. L. Harp, G. F. Wieczoreck, C. S. Alger, e R. S. Zarkin. Real-time Landslide Warning During Heavy Rainfall. *Science*, 238, 921-926, 1987.

- K. S. Kelly, e R. Krzysztofowicz. A bivariate meta-Gaussian density for use in hydrology. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 11(1):17- 31, 1997.
- K. S. Kelly, e R. Krzysztofowicz. Precipitation uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting. *Water Resources Research*, 36 (9):2643–2653, 2000.
- J. W. Kirchner, R. P. Hooper, C. Kendall, C. Neal, e G. Leavesley. Testing and validating environmental models. *The Science of the Total Environment*, 183:33-47, 1996.
- V. Klemeš. Dilettantism in hydrology: Transition or destiny?. *Water Resources Research*, 22:1775-1885, 1986a.
- V. Klemeš. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1):13-24, 1986b.
- L. F. Konikow, e J. D. Bredehoeft. Groundwater models cannot be validated. *Advances in Water Resources*, 15:75-83, 1992.
- R. Krzysztofowicz. Probabilistic hydro-meteorological forecasting system: A conceptual design. In *Third National Heavy Precipitation Workshop, NOAA Tech. Mem. NWS ER-87*, pages 29-42. Natl. Weather Serv., Eastern Reg., Bohemia, N.Y., 1993.
- R. Krzysztofowicz. Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model. *Water Resources Research*, 35 (9):2739–2750, 1999.
- R. Krzysztofowicz. Integrator of uncertainties for probabilistic river stage forecasting: precipitation-dependent model. *Journal of Hydrology*, 249(1–4):69–85, 2001.
- R. Krzysztofowicz. Bayesian system for probabilistic river stage forecasting. *Journal of Hydrology*, 268:16–40, 2002.
- R. Krzysztofowicz, e H. D. Herr. Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting: precipitation-dependent model. *Journal of Hydrology*, 249:46–68, 2001.
- R. Krzysztofowicz, e K. S. Kelly. Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting. *Water Resources Research*, 36(11):3265 (2000WR900108), 2000.
- G. Kuczera. NLFIT: A Bayesian nonlinear regression program suite. Dep. of Civ. Eng. and Surv., Univ. of Newcastle, Callaghan, N. S. W., Australia, 1994.
- S. N. Lane, e K. S. Richards. The validation of Hydrodynamic Models: Some Critical Perspectives. In Anderson and Bates, editors, *Model Validation Perspective in Hydrological Science*, pages 413-438, 2001.
- A. J. Lawrence e P. A. W. Lewis. A New Autoregressive Time Series model in Exponential Variables [NEAR(1)]. *Adv. Appl. Prob.*, 13(4): 826-845, 1981.
- K. F. Liu, e S. C. Chen. Integrated debris-flows monitoring system and virtual center. *Proc. of the III International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment*, Davos, vol. 2, 767– 774, 2003.
- P. Lumb, Slope failures in Hong Kong in Q. *Jl. Engng. Geol.* 1975, vol. VIII.
- D. Maidment, e Ximing Cai. Hydrologic Response Units - the concept and implementation, <http://www.ce.utexas.edu/stu/caix/hpj.html>.
- A. Montanari, e A. Brath. A stochastic approach for assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations. *Water Resources Research*, 40:w01106, doi:10.1029/2003wr002540, 1-11, 2004.
- D. R. Montgomery, e W. E. Dietrich. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4):1153-1171, 1994.
- B. A. Morgan, G. F. Wieczorek, R. H. Campbell, e P. L. Gori. Debris flow hazards in areas affected by the June 27, 1995 storm in Madison County, Virginia. *USGS Open File Report*, 97– 438, 1997.
- M. Moser e F. Hohensin. Geotechnical Aspects of Soil Slips in Alpine Regions. *Eng. Geol.*, 19, 1983.
- National Research Council (NRC), *Groundwater Models: Scientific and Regulatory Applications*. Washington: National Academy Press, 1990.
- E. M. O'Loughlin. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic

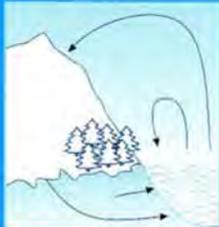
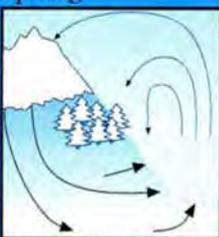
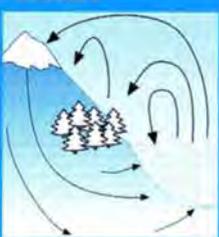
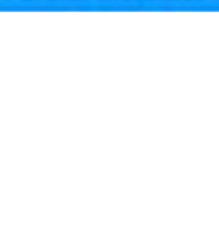
Pasquale Versace

- analysis, *Water Resources Research*, Vol.22, 794-804, 1986.
- N. Oreskes, K. Shrader-Frechette, e K. Belitz. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263: 641-646, 1994.
- N. Oreskes, e K. Belitz. Philosophical Issues in model Assessment. In Anderson e Bates, editors, *Model Validation Perspective in Hydrological Science*, pages 23-41, 2001.
- R. T. Pack, D. G. Tarboton, e C. N. Goodwin. SINMAP, a stability index approach to terrain stability hazard mapping. SINMAP user's manual, 68 pp. Terratech Consulting Ltd, 1998.
- G. Polloni, M. Ceriani, S. Lauzi, N. Padovan, e G. Crosta. Rainfall and soil slipping events in Valtellina. *Proc. of the VI International Symposium on Landslides*. Christchurch, Nuova Zelanda, 1, 183-188, 1992.
- K. R. Popper. *The Logic of Scientific Discovery*. Hutchinson, London, 1968.
- J. C. Refsgaard, e J. Knudsen. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, 32(7):2189-2202, 1996.
- J. C. Refsgaard, e B. Storm. MIKE SHE. In V. P. Singh, editor, *Computer Models of Watershed Hydrology*, pages 809-846. Water Resource Publications, Highlands Park, CO, 1995.
- J. C. Refsgaard, B. Storm, e M. B. Abbott. Comment on "A discussion of distributed hydrological modelling" by K. J. Beven. In Abbott e Refsgaard, editors. *Distributed Hydrological Modelling*, pages 279-287. Kluwer Academic: Dordrecht, 1996.
- P. Reggiani, M. Sivapalan, e S. M. Hassanizadeh. Conservation equations governing hillslope responses: Exploring the physical basis of water balance. *Water Resources Research*, 36 (7):1845-1863, 2000.
- I. Rodriguez-Iturbe, V. K. Gupta e E. Waymire. Scale consideration in modelling of temporal rainfall. *Water Resour. Res.*, 20(11): 1611-1619, 1984.
- I. Rodriguez-Iturbe, D. R. Cox e V. Isham. Some models for rainfall based on stochastic point processes. *Proc. Royal Soc. London (A)*, 410: 269-288, 1987.
- R. Romanowicz, K. J. Beven, e J. Tawn. Evaluation of predictive uncertainty in non-linear hydrological models using a Bayesian approach. In Barnett e Turkman, editors, *Statistics for the Environment*, pages 297-317. John Wiley, New York, 1994.
- E. J. Rykiel. Letters, *Science*. 264, 329, 1994.
- J. D. Salas, J. W. Delleur, V. Yevjevich e W. L. Lane. Applied modelling of hydrologic time series. Water Resources Publications, Littleton, CO, 1980.
- J. D. Salas e M. Chebaane. Stochastic Modeling of Monthly Flows in Streams of Arid Regions. *Proc. Int. Symp. HY&IR Div.*, Am. Soc. Civ. Eng., San Diego, CA, 1990.
- J. Seibert. Begreppsmässiga avrinningsmodeller - tillförlitliga verktyg i vattenplaneringen?, *Vatten* 55(3): 209-214, 1999.
- J. Seibert, e J. J. McDonnell. On the dialog between experimentalist and modeller in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration. *Water Resources Research*, 38(11):1241, 2002.
- M. Sivapalan. Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: is there a connection?. *Hydrological Processes*, 17:1037-1041, 2003.
- B. Sirangelo e G. Iiritano. Some aspects of the rainfall analysis through stochastic models. *Excerpta*, 11: 223-258, 1997
- B. Sirangelo, e P. Versace. Modelli stocastici di precipitazione e soglie pluviometriche di innesco dei movimenti franosi. *Atti del XXIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Firenze, vol. IV, D361-D373, 1992.
- B. Sirangelo, e P. Versace. A Real Time Forecasting for Landslides Triggered by Rainfall. *Meccanica*, 31, 1-13, 1996.
- B. Sirangelo e P. Versace. Un modello probabilistico per la predizione in tempo reale delle altezze di precipitazione a scala oraria. *Atti*

- del XXVIII Convegno di Idraulica e di Costruzioni Idrauliche, Potenza, 2002.
- B. Sirangelo, P. Versace, e G. Capparelli. Forewarning model for landslides triggered by rainfall based on the historical data file. *Proc. of Internationale Symposium Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions*, Montpellier, IAHS Publ. no 278, 2003.
- R. C. Spear, e G. M. Hornberger. Eutrophication in Peel Inlet, II, Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis. 14:43-49, 1980.
- M. Thiemann, M. Trosset, H. Gupta, e S. Sorooshian. Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models. *Water Resources Research*, 37(10):2521- 2535, 2001.
- D. Tiranti, L. Mensio e D. S. Murgese. Relationships between rainfall levels and landslides: critical rainfall thresholds and the triggering of translation-rock-block slides according to the evolutional stage for the Piedmont Region. *32nd International Geological Congress*, Florence (Italy), 2004.
- E. Todini. New trends in modelling soil processes from hill-slope to GCMS Scales, The role of water and the hydrological cycle in global change, edited by H. R. Oliver, S. A. Oliver, NATO ASI Series I: Global Environmental Change, 31: 317-347, 1995.
- N. K. Tuteja, e C. Cunnane. Modelling coupled transport of mass and energy into the snowpack, Model development, validation and sensitivity analysis. *Journal of Hydrology*, 195(1/4):232-255, 1997.
- M. Weiler, e F. Naef. An Experimental Tracer Study of the Role of Macropores in Infiltration in Grassland Soils. *Hydrological Processes*, 17:477-493, 2003.
- A. W. Western, R. B. Grayson, G. Bloschl, e T. A. Willgoose. Observed spatial organisation of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resources Research*, 35:797-810, 1999.
- M. S. Wigmosta, L. W. Vail, e D. P. Lettenmaier. A Distributed Hydrology-Vegetation Model for Complex Terrain. *Water Resources Research*, 30 (6):1665-1679, 1994.
- D. A. Woolhiser. Search for physically based runoff model – A hydrologic El Dorado?. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122-129, 1996.
- W. Wu, e R. C. Sidle. A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*, 31(8):2097-2110, 1995.
- P. Versace, D. Biondi, e B. Sirangelo. La generazione dei deflussi nella simulazione delle piene fluviali. Atti del XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. vol. II: 855-862, Trento, 2004.
- P. Versace, B. Sirangelo, e G. Iiritano. Soglie pluviometriche di innesco dei fenomeni franosi. *L'Acqua*, 3,113-130, 2000.
- P. Versace, B. Sirangelo, e G. B. Chirico. Analisi idrologica dell'innesco pluviometrico dell'evento di Sarno del 5 maggio 1998. *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche*, pubblicazione n. 1925, 1998.
- R. A. Vertessy, T. J. Hatton, P. J. O'Shaughnessy, e M. D. A. Jayasuriya. Predicting water yield from a mountain ash forest using a terrain analysis based catchment model. *Journal of Hydrology*, 150:665-700, 1993.
- R. Vertessy, E. O'Loughlin, E. Beverly, e T. Butt. Australian experiences with the CSIRO Topog model in land and water resources management. In: *Proceedings of UNESCO International Symposium on Water Resources Planning in a Changing World*, Karlsruhe, Germany, June 28-30, 1994, pp. III-135-144, 1994.
- J. A. Vrugt, H. V. Gupta, W. Bouten, e S. Sorooshian. A shuffled complex evolution Metropolis Algorithm for optimisation and uncertainty assessment of hydrological model parameters. *Water Resou. Res.*, 39:1201, 2003.
- R. J. Zhao, Y. L. Zhuang, L. R. Fang, X. R. Liu, e Q. S. Zhang. The Xinanjiang model, Proc. Oxford Symposium on Hydrological Forecasting, IAHS Publication No. 129, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, U.K., 351-356, 1980.

APPENDICE

Publicazioni di autori italiani sulle riviste internazionali *Water Resources Research e Journal of Hydrology* dal 1991 a luglio 2004.

Water Resources Research		
Gennaio 1991	Growth of alternate bars in unsteady flow	
	Tubino	
Febbraio 1991	A new formulation for transmissivity estimation with improved global convergence properties	
	Tucciarelli, Ahlfeld	
Marzo 1991	Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks	
	Rosso, Bacchi, Barbera	
Aprile 1991	Geomorphological dispersion	
	Rinaldo, Marani, Rigon,	
Aprile 1991	Optimal data acquisition strategy for the development of a transport model for groundwater remediation	
	Tucciarelli, Pinder	
Maggio 1991	Stochastic dynamic programming for reservoir optimal control: Dense discretization and inflow correlation assumption made possible by parallel computing	
	Piccardi, Soncini-Sessa	
Giugno 1991	Numerical evaluation of iterative and noniterative methods for the solution of the nonlinear Richards equation	
	Paniconi, Aldama, Wood	
Giugno 1991	A hierarchical approach to regional flood frequency analysis	
	Gabriele, Arnell	
Novembre 1991	Mathematical simulation of the subsidence of Ravenna	
	Gambolati, Ricceri, Bertoni, Brighenti, Vuillermin	
Novembre 1991	A note on transport in stratified formations by flow tilted with respect to the bedding	
	Salandin, Rinaldo, Dagan	
Dicembre 1991	A note on fractal channel networks	
	Marani, Rigon, Rinaldo	
Gennaio 1992	Coupled and partially coupled Eulerian-Lagrangian model of freshwater-seawater mixing	
	Galeati, Gambolati, Neuman	

Published by AGI

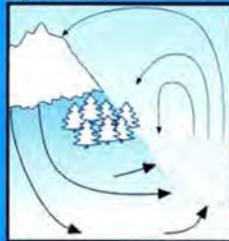
Water Resources Research

- Febbraio 1992
On the integration of risk aversion and average-performance optimization in reservoir control
 Nardini, Piccardi, Soncini-Sessa
- Aprile 1992
Energy dissipation, runoff production, and the three-dimensional structure of river basins
 Rodriguez-Iturbe, Rinaldo, Rigon, Bras, Marani, Ijjasz-Vásquez
- Settembre 1992
Minimum energy and fractal structures of drainage networks
 Rinaldo, Rodriguez-Iturbe, Rigon, Bras, Ijjasz-Vásquez, Marani
- Settembre 1992
Simulation of dispersion in heterogeneous porous formations: Statistics, first-order theories, convergence of computations
 Bellin, Salandin, Rinaldo
- Ottobre 1992
Analysis of the relationships between flood peaks and flood volumes based on crossing properties of river flow processes
 Bacchi, Brath, Kotegoda
- Dicembre 1992
Moving finite element model for one-dimensional infiltration in unsaturated soil
 Gottardi, Venutelli
- Gennaio 1993
Modeling infiltration for multistorm runoff events
 Smith, Corradini, Melone
- Aprile 1993
Self-similar heterogeneity in granular porous media at the representative elementary volume
 Ghilardi, Kal, Menduni
- Aprile 1993
An entropy-based morphological analysis of river basin networks
 Fiorentino, Claps, Singh
- Aprile 1993
On time integration of groundwater flow equations by spectral methods
 Gambolati
- Giugno 1993
A detailed model for simulation of catchment scale subsurface hydrologic processes
 Paniconi, Wood
- Giugno 1993
Optimal channel networks: A framework for the study of river basin morphology
 Rigon, Rinaldo, Rodriguez-Iturbe, Bras, Ijjasz-Vásquez

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

Water Resources Research

- Giugno 1993
Evaluation of a distributed catchment scale water balance model
Troch, Mancini, Paniconi, Wood,
- Agosto 1993
Conceptual-stochastic modeling of seasonal runoff using autoregressive moving average models and different scales of aggregation
Claps, Rossi, Vitale
- Agosto 1993
Adaptive calibration of a conceptual model for flash flood forecasting
Brath, Rosso
- Agosto 1993
Modeling of streamflow processes at different time scales
Bartolini, Salas
- Dicembre 1993
Linear equilibrium adsorbing solute transport in physically and chemically heterogeneous porous formations, 1, Analytical solutions
Bellin, Rinaldo, Bosma, van der Zee, Rubin
- Dicembre 1993
Linear equilibrium adsorbing solute transport in physically and chemically heterogeneous porous formations, 2, Numerical results
Bosma, Bellin, van der Zee, Rinaldo
- Marzo 1994
Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness
Rossi, Nimmo
- Luglio 1994
A flood routing Muskingum type simulation and forecasting model based on level data alone
Franchini, Lamberti
- Ottobre 1994
Modeling infiltration during complex rainfall sequences
Corradini, Melone, Smith
- Dicembre 1994
A comparison of Picard and Newton iteration in the numerical solution of multidimensional variably saturated flow problems
Paniconi, Putti
- Dicembre 1994
Self-organized river basin landscapes: Fractal and multifractal characteristics
Rodriguez-Iturbe, Marani, Rigon, Rinaldo
- Aprile 1995
Can one gauge the shape of a basin?
Rinaldo, Vogel, Rigon, Rodriguez-Iturbe

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

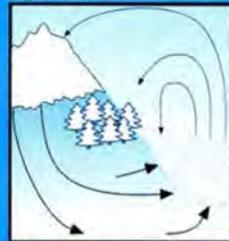
Water Resources Research

- Giugno 1995
Analytical solutions for transport of linearly adsorbing solutes in heterogeneous formations
 Bellin, Rinaldo
- Agosto 1995
A new method for the identification of distributed transmissivities
 Giudici, Morossi, Parravicini, Ponzini
- Gennaio 1996
Finite Peclet extensions of Dagan's solutions to transport in anisotropic heterogeneous formations
 Fiori
- Gennaio 1996
A block iterative finite element model for nonlinear leaky aquifer systems
 Gambolati, Teatini
- Marzo 1996
Retrieving soil moisture over bare soil from ERS 1 synthetic aperture radar data: Sensitivity analysis based on a theoretical surface scattering model and field data
 Altese, Bolognani, Mancini, Troch
- Luglio 1996
Steady flow toward wells in heterogeneous formations: Mean head and equivalent conductivity
 Indelman, Fiori, Dagan
- Luglio 1996
Local contributions to infiltration excess runoff for a conceptual catchment sale model
 Orlandini, Mancini, Paniconi, Rosso
- Settembre 1996
The impact of head gradient transients on transport in heterogeneous formations: Application to the Borden Site
 Bellin, Dagan, Rubin
- agosto 1996
Lagrangian analysis of nonreactive pollutant dispersion in porous media by means of the particle image velocimetry technique
 Cenedese, Viotti
- Dicembre 1996
On transport in porous formations characterized by heterogeneity of evolving scales
 Bellin, Pannone, Fiori, Rinaldo
- Novembre 1996
On Hack's law
 Rigon, Rodriguez-Iturbe, Maritan, Giacometti, Tarboton, Rinaldo
- ottobre 1996
Reexamining the determination of the fractal dimension of river networks
 Claps, Oliveto

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

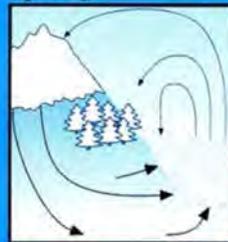
Water Resources Research

- Gennaio 1997
Forcing, intermittency, and land surface hydrologic partitioning
Marani, Grossi, Napolitano, Wallace, Entekhabi
- Marzo 1997
Influence of transverse mixing on the breakthrough of sorbing solute in a heterogeneous aquifer
Berglund, Fiori
- Maggio 1997
Fractionally differenced ARIMA models applied to hydrologic time series: Identification, estimation and simulation
Montanari, Rosso, Taqqu
- Maggio 1997
Scaling of random fields by means of truncated power variograms and associated spectra
Di Federico, Neuman
- Giugno 1997
A methodology to determine optimal transmissivity measurement locations in groundwater quality management models with scarce field information
Criminisi, Tucciarelli, Karatzas
- Giugno 1997
Nonlinear analysis of river flow time sequences
Porporato, Ridolfi
- Giugno 1997
Experimental investigation of mobile armoring development
Marion, Fraccarollo
- Luglio 1997
The influence of pore-scale dispersion on concentration statistical moments in transport through heterogeneous aquifers
Dagan, Fiori
- Aprile 1998
Correlation structure of flow variables for steady flow toward a well with application to highly anisotropic heterogeneous formations
Fiori, Indelman, Dagan
- Maggio 1998
Solute transport in highly heterogeneous aquifers
Salandin, Fiorotto
- Maggio 1998
Transport in multiscale log conductivity fields with truncated power variograms
Di Federico, Neuman
- Giugno 1998
Finite amplitude bed deformations in totally and partially transporting wide channel bends
Seminara, Solari

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

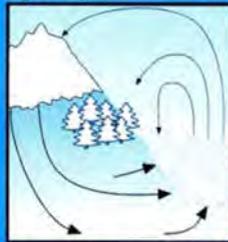
Water Resources Research

- Giugno 1998
Scale invariance properties of the peak of the width function in topologically random networks
 Agnese, Criminisi, D'Asaro
- Agosto 1998
Parameterization of stream channel geometry in the distributed modeling of catchment dynamics
 Orlandini, Rosso
- Dicembre 1998
On space-time scaling of cumulated rainfall fields
 Rodriguez-Iturbe, Marani, D'Odorico, Rinaldo
- Gennaio 1999
Concentration fluctuations in transport by groundwater: Comparison between theory and field experiments
 Fiori, Dagan
- Gennaio 1999
Coastline regression of the Romagna region, Italy, due to natural and anthropogenic land subsidence and sea level rise
 Gambolati, Teatini, Tomasi
- Aprile 1999
Combined spatial and Kalman filter estimation of optimal soil hydraulic properties
 Cahill, Ungaro, Parlange, Mata, Nielsen
- Aprile 1999
River flood forecasting with a neural network model
 Campolo, Andreussi, Soldati
- Maggio 1999
A conceptual model for infiltration and redistribution in crusted soil
 Smith, Corradini, Melone
- Maggio 1999
Head and flux variability in heterogeneous unsaturated soils under transient flow conditions
 Ferrante, Jim Yeh
- Giugno 1999
Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall
 Deidda, Benzi, Siccardi
- Giugno 1999
Multifrequency radar observations of bare surface soil moisture content: A laboratory experiment
 Mancini, Hoeben, Troch
- Settembre 1999
Best linear unbiased design hyetograph
 Veneziano, Villani

Winter



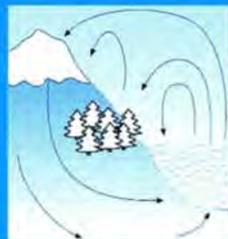
Spring



Summer



Fall



Published by AGU

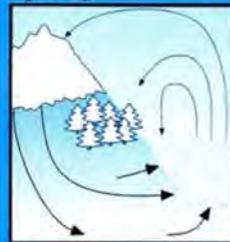
Water Resources Research

- 1999
Ottobre
Anisotropy, lacunarity, and upscaled endictivity and its autocovariance in multiscale random fields with truncated power variograms
Di Federico, Neuman, Tartakovsky
- 1999
Ottobre
Nonlocal and localized analyses of conditional mean steady state flow in bounded, randomly nonuniform domains. 1. Theory and computational approach
Guadagnini, Neuman
- 1999
Ottobre
Nonlocal and localized analyses of conditional mean steady state flow in bounded, randomly nonuniform domains. 2. Computational examples
Guadagnini, Neuman
- 1999
Ottobre
Estimation of surface heat flux and an index of soil moisture using adjoint-state surface energy balance
Castelli, Entekhabi, Caporali
- 1999
Ottobre
Solute transport in heterogeneous porous media with long-range correlation
Di Federico, Zhang
- 1999
Novembre
Determining soil hydraulic functions from evaporation experiments by a parameter estimation approach: Experimental verifications and numerical studies
Romano, Santini
- 1999
Novembre
Forecasting river flow rate during low-flow periods using neural networks
Campolo, Andreussi, Soldati
- 1999
Dicembre
On the spatial and temporal links between vegetation, climate and soil moisture
Rodriguez-Iturbe, D'Odorico, Porporato, Ridolfi
- 1999
Dicembre
Tidal Networks. 1. Automatic network extraction and preliminary scaling features from digital terrain maps
Fagherazzi, Bortoluzzi, Dietrich, Adami, Lanzoni, Marani, Rinaldo
- 1999
Dicembre
Tidal Networks. 2. Watershed delineation and comparative network morphology
Rinaldo, Fagherazzi, Lanzoni, Marani
- 1999
Dicembre
Tidal Networks. 3. Landscape-forming discharges and studies in empirical geomorphic relationships
Rinaldo, Fagherazzi, Lanzoni, Marani
- 2000
Febbraio
Slope curvatura influence on soil erosion and deposition processes
Di Stefano, Ferro, Porto, Tusa

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

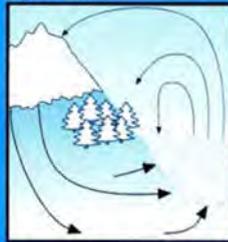
Water Resources Research

	Febbraio	2000
Derived distribution of floods based on the concept of partial area coverage with a climatic appeal		
	Fiorentino, Iacobellis	
	Marzo	2000
Models of flux in porous media with memory		
	Caputo	
	Aprile	2000
Stochastic model of the width function		
	Veneziano, Moglen, Furcolo, Iacobellis	
	Giugno	2000
Dispersion tensor evaluation in heterogeneous media for finite Peclet values		
	Salandin, Fiorotto	
	Luglio	2000
Rainfall downscaling in a space-time multifractal framework		
	Deidda	
	Agosto	2000
Duration and frequency of water stress in vegetation: an analytical model		
	Rodríguez-Iturbe, Porporato, D'Odorico, Ridolfi	
	Agosto	2000
Preferential states of seasonal soil moisture: the impact of climate fluctuations		
	Rodríguez-Iturbe, Porporato, D'Odorico, Ridolfi	
	Settembre	2000
Incomplete self-similarity and flow velocity in gravel bed channels		
	Ferro, Pecoraro	
	Settembre	2000
Importance of poroelastic coupling in dynamically active aquifers of the Po river basin, Italy		
	Gambolati, Teatini, Baù, Ferronato	
	Novembre	2000
Experiments on bar formation in a straight flume. 1. Uniform sediment		
	Lanzoni	
	Novembre	2000
Experiments on bar formation in a straight flume. 2. Grated sediment		
	Lanzoni	
	febbraio	2001
On the influence of local dispersion in solute transport through formations with evolving scales of heterogeneity		
	Fiore	

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

Water Resources Research

marzo 2001
New insights about the climatic and geologic control on the probability distribution of floods
 Fiorentino, Iacobellis

aprile 2001
Three-dimensional particle tracking velocimetry studies of the transition from pore dispersion to Fickian dispersion for homogeneous porous media
 Moroni, Cushman

maggio 2001
On the cumulative area distribution of natural drainage basins along a coastal boundary
 La Barbera, Lanza

giugno 2001
Land data assimilation with satellite measurements for the estimation of surface energy balance components and surface control on evaporation
 Boni, Entekhabi, Castelli

settembre 2001
On the relative role of hydrodynamic dispersion for river water quality
 Gandolfi, Facchi, Whelan

settembre 2001
On non-Newtonian fluid flow in rough fractures
 Di Federico

ottobre 2001
Geomorphic controls on regional base flow
 Marani, Eltahir, Rinaldo

dicembre 2001
The ecohydrological role of soil texture in a water-limited ecosystem
 Fernandez-Illescas, Porporato, Laio, Rodriguez-Iturbe

dicembre 2001
Robust simulation of root zone soil moisture with assimilation of surface soil moisture data
 Montaldo, Albertson, Mancini, Kiely

dicembre 2001
Evapotranspiration of sweet sorghum: a general model and multilocal validity in semiarid environmental conditions
 Rana, Katerji, Perniola

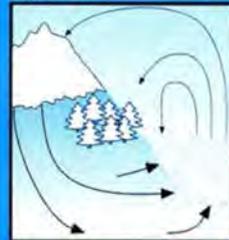
dicembre 2001
The derivation of areal reduction factor of storm rainfall from its scaling properties
 De Michele, Kottegoda, Rosso

febbraio 2002
Uncertainty analysis of transient unsaturated flow in bounded domain
 Ferrante, Jim Yeh, Brunone

Winter



Spring



Summer



Fall

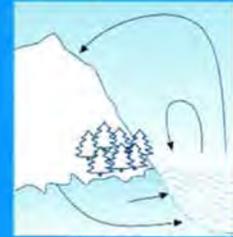


Published by AGU

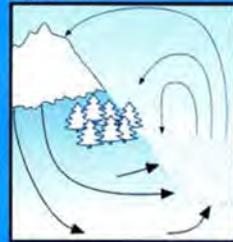
Water Resources Research

- aprile 2002
Conditional moment analysis of steady state unsaturated flow in boundend, randomly heterogeneous soils
 Lu, Neumann, Guadagnini, Tartakovsky
- maggio 2002
A stochastic approach to evaluation of residence times
 Maran
- maggio 2002
Numerical solutions of moment equations for flow in heterogeneous composite aquifers
 Winter, Guadagnini, Tartakovsky
- agosto 2002
Multiscaling pulse representation of temporal rainfall
 Veneziano, Iacobellis
- ottobre 2002
On the spatial variation of resistance to flow in upland channel networks
 Orlandini
- ottobre 2002
Effect to bed form geometry on fire penetration of nonreactive solutes into a streambed
 Marion, Bellinello, Guymer, Packman
- novembre 2002
Tidal meanders
 Marani, Lanzoni, Zandolin, Seminara, Rinaldo
- novembre 2002
Long-Term assessment of bias adjustement in radar rainfall estimation
 Borga, Tonelli, Moore, Andrieu
- novembre 2002
Bed load at low Shields stress arbitrary sloping beds: Failure of the Bagnold hypotesis
 Seminara, Solari, Parker
- dicembre 2002
Validation of the physical modeling approach for braided rivers
 Rosatti
- dicembre 2002
Multifractality of rainfall and scaling of intensity-duration-frequency curves
 Veneziano, Furcolo
- Febbraio 2003
On drainage density of tidal networks
 Marani, Rinaldo, Belluco, D'Alpaos, Defina, Lanzoni

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

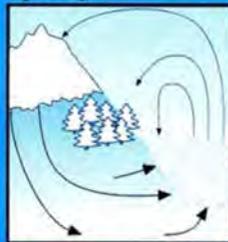
Water Resources Research

- Marzo 2003
Three-dimensional steady state flow to a well in a randomly heterogeneous bounded aquifer
Guadagnini, Neuman, Riva
- Marzo 2003
Mean travel time of conservative solutes in randomly heterogeneous unbounded domains under mean uniform flow
Guadagnini, Sánchez-Vila, Riva, De Simoni
- Marzo 2003
Channel bifurcation in braided rivers: Equilibrium configurations and stability
Bolla Pittaluga, Repetto, Tubino
- Aprile 2003
Numerical experiments on bar growth
Defina
- Maggio 2003
Time-dependent transport in heterogeneous formations of bimodal structures: 1. The model
Dagan, Fiori
- Maggio 2003
Time-dependent transport in heterogeneous formations of bimodal structures: 2. Results
Dagan, Fiori
- Maggio 2003
Hillslope and channel contributions to the hydrologic response
D'Odorico, Rigon
- Maggio 2003
On the correlation structure of continuous and discrete point rainfall
Marani
- Maggio 2003
Depth-integrated modeling of suspended sediment transport
Bolla Pittaluga, Seminara
- Maggio 2003
A comparison of nonlinear flood forecasting methods
Laio, Porporato, Ravelli, Ridolfi
- Giugno 2003
Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models
Orlandini, Moretti, Franchini, Aldighieri, Testa
- Giugno 2003
Dynamics of channel bifurcations in noncohesive sediments
Federici, Paola

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

Water Resources Research

- Luglio 2003
Application of the transient storage model to analyze advective hyporheic exchange with deep and shallow sediment beds
 Zaramella, Packman, Marion
- Luglio 2003
Local scouring at grade-control structures in alluvial mountain rivers
 Lenzi, Marion, Comiti
- Luglio 2003
Bed load at low Shields stress arbitrary sloping beds: Alternative entrainment formulation
 Parker, Seminara, Solari
- Agosto 2003
Can continuous streamflow data support flood frequency analysis? An alternative to the partial duration series approach
 Claps, Laio
- Settembre 2003
On the use of block-effective macrodispersion for numerical simulations of transport in heterogeneous formations
 Rubin, Bellin, Lawrence
- Settembre 2003
Flow and transport in highly heterogeneous formations: 1. Conceptual framework and validity of first-order approximations
 Dagan, Fiori, Jankovic
- Settembre 2003
Flow and transport in highly heterogeneous formations: 2. Semianalytical results for isotropic media
 Dagan, Fiori, Jankovic
- Settembre 2003
Flow and transport in highly heterogeneous formations: 3. Numerical simulations and comparison with theoretical results
 Dagan, Fiori, Jankovic
- Settembre 2003
A probabilistic model of rainfall-triggered shallow landslides in hollows: A long-term analysis
 D'Odorico, Fagherazzi
- Ottobre 2003
Temporal dynamics of soil moisture variability: 1. Theoretical basis
 Albertson, Montaldo
- Ottobre 2003
Temporal dynamics of soil moisture variability: 2. Implications for land surface models
 Albertson, Montaldo
- Ottobre 2003
Scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion
 Botter, Rinaldo

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

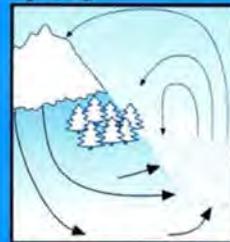
Water Resources Research

- Ottobre 2003
Reforming the wastewater treatment sector in Italy: Implications of plant size, structure, and scale economies
Fraquelli, Giandrone
- Novembre 2003
Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes:1. Formulation and characteristic response
Troch, Paniconi, van Loon
- Novembre 2003
Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes:2. Intercomparison with a three-dimensional Richards equation model
Troch, Paniconi, van Loon
- Dicembre 2003
Hysteresis in soil water characteristic as a key to interpreting comparison of laboratory and field measured hydraulic properties
Basile, Ciollaro, Coppola
- Dicembre 2003
Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models
Soille, Vogt, Colombo
- Dicembre 2003
Assessing the reliability of regional depth-duration-frequency equations for gaged and ungaged sites
Brath, Castellarin, Montanari
- Dicembre 2003
A comparison of stochastic models for spatial rainfall downscaling
Ferraris, Gabellani, Rebora, Provenzale
- Dicembre 2003
A geostatistical approach to recover the release history of groundwater pollutants
Butera, Tanda
- Gennaio 2004
Water cycling in a Bornean tropical rain forest under current and projected precipitation scenarios
Kumagai, Katul, Saiton, Sato, Manfroi, Morooka, Ichie, Kuraji, Suzuki, Porporato
- Gennaio 2004
A stochastic approach for assessing the uncertainty for rainfall-runoff simulations
Montanari, Brath
- Gennaio 2004
Combined effect of heterogeneity, anisotropy and saturation on steady state flow and transport: Structure recognition and numerical simulation
Ursino, Gimmi
- Gennaio 2004
A note on groundwater flow along hillslope
Daly, Porporato

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

Water Resources Research

Febbraio 2004

Multifractal analysis of river networks. Sandbox approach

De Bartolo, Gaudio, Gabriele

Febbraio 2004

Topographical attributes to predict soil hydraulic properties along a hillslope transect

Leij, Romano, Palladino, Schaap, Coppola

Febbraio 2004

Drought length properties for periodic-stochastic hydrologic data

Cancelliere, Salas

Febbraio 2004

Space-time scaling in high-intensity Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Responce Experiment (TOGA-COARE) storms

Deidda, Badas, Piga

Marzo 2004

A stochastic index flow model of flow duration curves

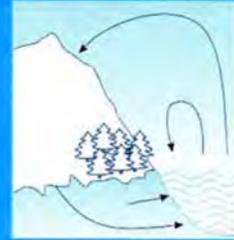
Castellarin, Vogel, Brath

Marzo 2004

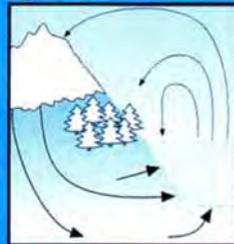
Experiments on upstream-migrating erosional narrowing and widening of an incisional channel caused by dam removal

Cantelli, Paola, Parker

Winter



Spring



Summer



Fall



Published by AGU

JOURNAL OF HYDROLOGY

- gennaio 1991
Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models
Franchini, Pacciani
- luglio 1992
Non-linear modelling of rainfall-runoff transformation
Natale
- agosto 1992
Rainfall interception in a beech coppice (Acquerino Italy)
Giacomin, Trucchi
- novembre 1992
Isotopic composition of natural thermal discharges Vulcano island, southern Italy
Minissale
- aprile 1993
Forecasting of short-term rainfall using ARMA models
Burlando, Rosso, Cadavid, Salas
- gennaio 1994
A regional model for estimating the probability distribution of routed peak discharges
Bertoli, Moisélo
- febbraio 1994
Hydrogeochemistry of the volcanic district in the Tolfa and Sabatini Mountains in central Italy
Dell'Aglio, Duchi, Guerrini, Minissale, Tremori
- febbraio 1994
Hydrogeological implications of the resistivity distribution inferred from electrical prospecting data from the Apulian carbonate platform
Quarto, Schiavone
- marzo 1994
Bivariate exponential model applied to intensities and durations extreme rainfall
Bacchi, Becciu, Kottegoda
- giugno 1994
Two-component log-normal distribution of irrigation-affected low flows
Natale, Kottegoda
- Febbraio 1995
Systematic hydrogeological study of a hypothermal spring (S. Cesarea Terme, Apulia), Italy
Calò, Tinelli
- Febbraio 1995
Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall
Bacchi, Kottegoda

JOURNAL OF HYDROLOGY

- Aprile 1995
Evaluation of surface soil moisture distribution by means of SAR remote sensing techniques and conceptual hydrological modelling
Giacomelli, Bacchiega, Troch, Mancini
- Aprile 1995
Distributed estimation of incoming direct solar radiation over a drainage basin
Ranzi, Rosso
- Gennaio 1996
Probabilistic estimation of well catchments in heterogeneous aquifers
Franzetti, Guadagnini
- Febbraio 1996
Modelling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview
O'Connell, Todini
- Febbraio 1996
Flood propagation models for real-time forecasting
Lamberti, Pilati
- Febbraio 1996
A conservative finite elements approach to overland flow: the control volume finite element formulation
Di Giammarco, Todini, Lamberti
- Febbraio 1996
Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL
Franchini, Wendling, Obled, Todini
- Febbraio 1996
The ARNO rainfall—runoff model
Todini
- Febbraio 1996
An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph
Franchini, O'Connell
- Febbraio 1996
An extended formulation of the integrated finite difference method for groundwater flow and transport
Ferraresi, Marinelli
- Febbraio 1996
Stochastic storm transposition coupled with rainfall—runoff modeling for estimation of exceedance probabilities of design floods
Franchini, Helmlinger, Foufoula-Georgiou, Todini

JOURNAL OF HYDROLOGY

- Febbraio 1996
Flood risk assessment using an integrated hydrological and hydraulic modelling approach: a case study
Anselmo, Galeati, Palmieri, Rossi, Todini
- Febbraio 1996
Influence of parameter estimation uncertainty in Kriging
Todini, Ferraresi
- Febbraio 1996
A solution to the inverse problem in groundwater hydrology based on Kalman filtering
Ferraresi, Todini, Vignoli
- Giugno 1996
Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index
Cazorzi, Dalla Fontana
- Ottobre 1996
Mutual interaction of soil moisture state and atmospheric processes
Entekhabi, Rodriguez-Iturbe, Castell
- Ottobre 1996
An analytical framework for the modelling of the spatial interaction between the soil moisture and the atmosphere
Castelli, Rodriguez-Iturbe, Entekhabi
- Dicembre 1996
Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation
Burlando, Rosso
- Dicembre 1996
On the description of the basin effective drainage structure
Roth, La Barbera, Greco
- Dicembre 1996
On the fractal description of natural channel networks
Veltri M., Veltri P., Malolo
- Dicembre 1996
Informational entropy of fractal river networks
Claps, Fiorentino, Oliveto
- Dicembre 1996
Scaling properties of topologically random channel networks
Agnese, D'Asaro, Grossi, Rosso
- Dicembre 1996
Scaling properties of porous media with power-law particle size distributions
Ghilardi, Menduni

JOURNAL OF HYDROLOGY

- Maggio 1997
A unified model for infiltration and redistribution during complex rainfall patterns
Corradini, Melone, Smith
- Giugno 1997
Laboratory and in situ investigation of the isotopic ratio $^{79}\text{Br}/^{81}\text{Br}$ as a tracer of water migration in crystalline rocks
D'Alessandro, Bidoglio, Mousty, Benito, De Llano
- Agosto 1997
On the interpolation of hydrologic variables: formal equivalence of multiquadratic surface fitting and kriging
Borga, Vizzaccaro
- Ottobre 1997
A distributed approach for sediment yield evaluation in Alpine regions
Bemporad, Alterach, Amighetti
- Dicembre 1997
Hydrodynamic dispersion in an artesian aquifer during flow to a partially penetrating well
Ridolfi, Sordo
- Dicembre 1997
Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics
Romano, Santini
- Gennaio 1998
On the interaction between infiltration and Hortonian runoff
Corradini, Morbidelli, Melone
- Aprile 1998
A geostatistical framework for incorporating seismic tomography auxiliary data into hydraulic conductivity estimation
Cassiani, Böhm, Vesnaver, Nicolich
- Settembre 1998
A new method for the interpretation of the constant-head well permeameter
Cassiani
- Novembre 1998
Hydraulics of a partially penetrating well: solution to a mixed-type boundary value problem via dual integral equations
Cassiani
- Dicembre 1999
Parameter estimation of Neyman-Scott processes for temporal point rainfall simulation
Calenda, Napolitano
- Febbraio 2000
Influence of heterogeneity on the flow in unconfined aquifers
Revelli, Ridolfi

JOURNAL OF HYDROLOGY

- Luglio 2000
Statistical modelling of daily streamflows using rainfall input and curve number technique
Kottegoda, Natale, Raiteri
- Ottobre 2000
Modeling local infiltration for a two-layered soil under complex rainfall patterns
Corradini, Melone, Smith
- Novembre 2000
Sea water intrusion and mercury pollution of some coastal aquifers in the province of Grosseto (Southern Tuscany – Italy)
Grassi, Netti
- Novembre 2000
Studying the hydrological response of urban catchments using a semi-distributed linear non-linear model
Aronica, Cannarozzo
- Dicembre 2000
Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting
Toth, Brath, Montanari
- Gennaio 2001
Use of stream sediment chemistry to predict trace element chemistry of groundwater. A case study from the Bisagno valley (Genoa, Italy)
Marini, Canepa, Cipolli, Ottonello, Zuccolini
- Gennaio 2001
Assessing the effectiveness of hydrological similarity measures for flood frequency analysis
Castellarin, Burn, Brath
- Luglio 2001
Validating the use of caesium-137 measurements to estimate soil erosion rates in a small drainage basin in Calabria, Southern Italy
Porto, Walling, Ferro
- Luglio 2001
Multivariate nonlinear prediction of river flows
Porporato, Ridolfi
- Novembre 2001
Hydrogeochemistry of groundwaters from carbonate formations with basal gypsiferous layers: an example from the Mt Catria–Mt Nerone ridge (Northern Appennines, Italy)
Capaccioni, Didero, Paletta, Salvadori
- Maggio 2002
On the derived flood frequency distribution: analytical formulation and the influence of antecedent soil moisture condition
De Michele, Salvadori

JOURNAL OF HYDROLOGY

- Luglio 2002
Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge
Salvati, Sasowsky
- Agosto 2002
Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes
Romano, Palladino
- Ottobre 2002
Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation
Borga
- Ottobre 2002
Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging
Binley, Cassiani, Middleton, Winship
- Novembre 2002
Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index
Borga, Dalla Fontana, Cazorzi
- Dicembre 2002
Flow resistance in open channel flows with sparsely distributed bushes
Righetti, Armanini
- Dicembre 2002
An analytical-numerical approach to the hydraulics of floating debris in river channels
Bocchiola, Catalano, Menduni, Passoni
- Dicembre 2002
Preferential flow in macroporous swelling soil with internal catchment: model development and applications
Greco
- Gennaio 2003
Chloride profile technique to estimate water movement through unsaturated zone in a cropped area in subhumid climate (Po Valley-NW Italy)
Lo Russo, Zavattaro, Acutis, Zuppi
- Gennaio 2003
Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map
Longinelli, Selmo
- Marzo 2003
Stochastic soil moisture dynamics along a hillslope
Ridolfi, D'Odorico, Porporato, Rodriguez-Iturbe
- Marzo 2003
Determining the soil hydraulic conductivity by means of a field scale internal drainage
Severino, Santini, Sommella

JOURNAL OF HYDROLOGY

- Aprile 2003
A parsimonious approach to stochastic multisite modelling and disaggregation of daily rainfall
Kottegoda, Natale, Raiteri
- Dicembre 2003
An asymptotic analysis for determining concentration uncertainty in aquifer transport
Fiori
- Marzo 2004
Rainfall assimilation in RAMS by means of the Kuo parameterisation inversion: method and preliminary results
Orlandi, Ortolani, Meneguzzo, Levizzani, Torricella, Turk
- Marzo 2004
Sensitivity of meteorological high-resolution numerical simulations of the biggest floods occurred over the Arno river basin, Italy, in the 20th century
Meneguzzo, Pasqui, Menduni, Messeri, Gozzini, et. al.
- Marzo 2004
Scale-invariance laws in the recurrence interval of extreme floods: an application to the upper Po river valley (northern Italy)
Mazzarella, Rapetti
- Aprile 2004
Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: application of the Rayleigh model to selected rainfalls in Southern France
Celle-Jeanton, Gonfiantini, Travi, Sol
- Giugno 2004
"Catchment modelling: towards an improved representation of the hydrological processes in real-world model applications"
Montanari, Uhlenbrook
- Giugno 2004
The hillslope-storage Boussinesq model for non-constant bedrock slope
Hilberts, van Loon, Troch, Paniconi
- Giugno 2004
Analysis of the effects of different scenarios of historical data availability on the calibration of a spatially-distributed hydrological model
Brath, Montanari, Toth
- Giugno 2004
Methodological approach for evaluating the response of soil hydrological behavior to irrigation with treated municipal wastewater
Coppola, Santini, Botti, Vacca, Comegna, Severino
- Giugno 2004
Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins
Amore, Modica, Nearing, Santoro

JOURNAL OF HYDROLOGY

Luglio 2004

Introduction: Stochastic Models of Flow and Transport in Multiple-scale Heterogeneous Porous Media

Guadagnini, Winter

Luglio 2004

Transmissivity and head covariances for flow in highly heterogeneous aquifers

Dagan, Fiori, Jankovic

Luglio 2004

Probabilistic reconstruction of geologic facies

Guadagnini, L.; Guadagnini, A.; Tartakovsky

Luglio 2004

Runoff generation in karst catchments: multifractal analysis

Majone, Bellin, Borsato

