



Associazione Idrotecnica Italiana

Sezione Sicilia Occidentale

Seminario: Le dighe in Sicilia. Aggiornamento degli studi idrologici, adeguamento delle opere di scarico e interventi manutentivi strutturali.

26 APRILE 2017

Evoluzione della ricerca in idrologia e suoi riflessi sulla progettazione dei serbatoi artificiali

PROF. LEONARDO VALERIO NOTO



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO



Le dighe e i serbatoi artificiali contribuiscono allo sviluppo economico assicurando la **risorsa idrica** (potabile e irriguo), generando **energia elettrica** e regolando le **portate in uscita** (laminazione)



I progettisti e i gestori necessitano di valutazioni idrologiche affidabili per assicurare che la **struttura sia sempre in piena salute** e per **minimizzare eventuali impatti** all'ambiente e alle comunità locali.



Grand coulee dam
10 miliardi m³

Modalità operative sempre più sofisticate poiché aumenta la richiesta di **un sistema sempre più efficiente** nella fornitura di risorsa idrica e energetica.

Allo stesso tempo la **sicurezza dell'impianto** e la **mitigazione del rischio** rimangono di **importanza fondamentale**.



I gestori degli invasi devono spesso **bilanciare bisogni conflittuali**:

- mitigazione delle piene
- massimizzazione della produzione idroelettrica
- affidabilità dell'erogazione al settore idropotabile e irriguo.



Jinping-I dam
7,7 miliardi m³

Serbatoi artificiali: qualche numero

Esistono milioni di dighe e di serbatoi artificiali con una capacità totale stimata (al 2005) superiore a **6000 miliardi di m³** di acqua.

- **97%** di questa capacità totale è data dalle “**large dams.**” Secondo il *International Commission on Large Dams (I.C.O.L.D.)*, *large dams* includono 40 000 dighe più alte di 15m e alcune migliaia più basse ma con una capacità superiore a 3 milioni di m³.
- **2%** di questa capacità totale è data da più di 150 000 **small dams** (5 to 15m high) con capacità tra 100 000 e 3 milioni di m³.
- **1%** è dato da altre *small dam* con capacità inferiore a 100 000 m³.



Serbatoi artificiali: qualche numero





COMMISSION INTERNATIONALE
DES GRANDS BARRAGES
INTERNATIONAL COMMISSION
ON LARGE DAMS

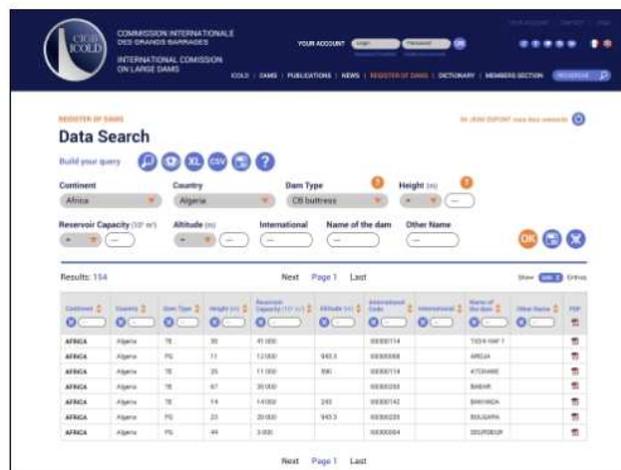
YOUR ACCOUNT
 Remember me [Password Forgotten](#)

YOUR ACCOUNT | CONTACT | LEGAL

[ICOLD](#) | [DAMS](#) | [NEWS](#) | [PUBLICATIONS](#) | [WORLD REGISTER OF DAMS](#) | [DICTIONARY](#) | [MEMBERS SECTION](#)

World Register of Dams

Database Presentation

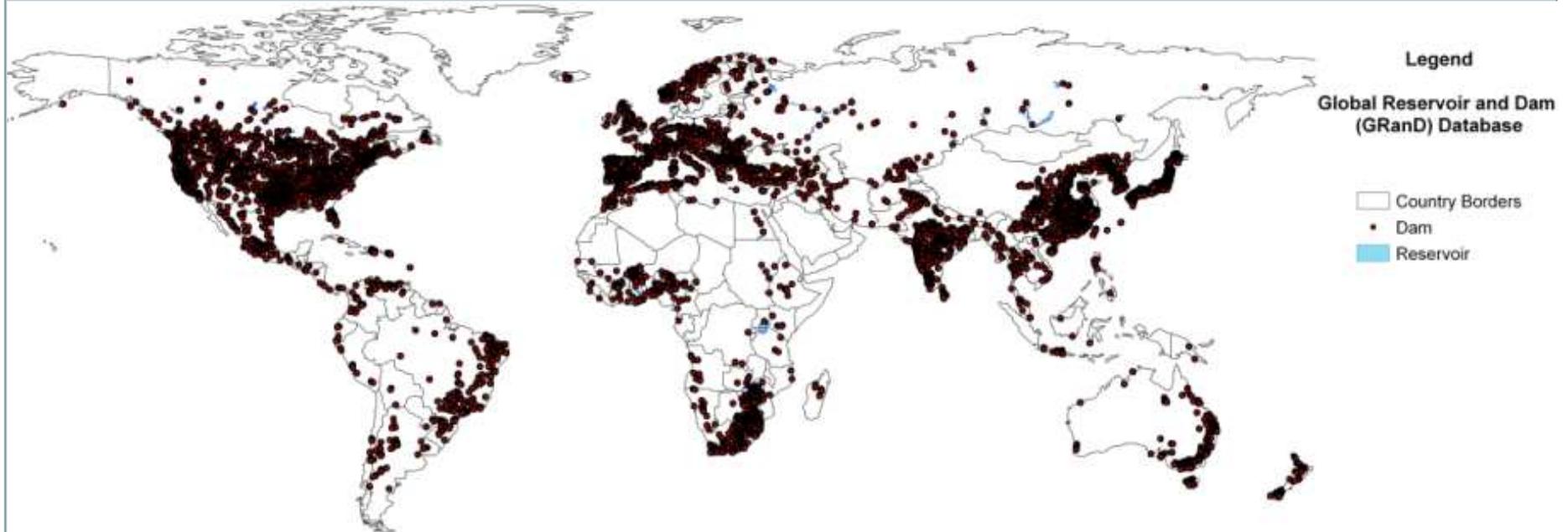


The screenshot shows the 'Data Search' interface of the World Register of Dams. It features a search bar and several filters: Continent (Africa), Country (Algeria), Dam Type (CB buttress), Height (m) (0-100), Reservoir Capacity (10^6 m^3) (0-100), and Altitude (m) (0-100). The search results are displayed in a table with columns for Continent, Country, Dam Type, Height (m), Reservoir Capacity (10^6 m^3), Altitude (m), International Name, and Other Name. The table shows 154 results, with the first few rows visible.

Continent	Country	Dam Type	Height (m)	Reservoir Capacity (10 ⁶ m ³)	Altitude (m)	International Name	Other Name
AFRICA	Algeria	CB	30	41 000		0000114	TODD DAM 1
AFRICA	Algeria	CB	71	12 000	940.3	0000068	ARGLA
AFRICA	Algeria	CB	35	11 000	940	0000114	4708480
AFRICA	Algeria	CB	67	30 000		0000033	SHABRA
AFRICA	Algeria	CB	14	14 000	240	0000142	SHABRA
AFRICA	Algeria	CB	23	20 000	940.3	0000033	SHABRA
AFRICA	Algeria	CB	49	3 000		0000004	SHABRA

The World Register of Dams is a database including more than 55 000 dams.

Serbatoi artificiali: qualche numero



The **Global Reservoir and Dam (GRanD) Database** provides the location and main specifications of large global reservoirs and dams with a storage capacity of more than 0.1km^3 both in point and polygon format. The current version 1.1 of GRanD contains 6,862 records of reservoirs with a cumulative storage capacity of $6,197\text{km}^3$ and their attribute data.

Serbatoi artificiali: qualche numero

Il volume totale (6200 miliardi di m³) viene qualche volta confrontato con il livello annuale di utilizzazioni (circa 4000 miliardi di m³) principalmente a scopo irriguo.

Unit Storage (in millions of m ³)	Number of dams	Total Storage (in billions of m ³)	Total area (in thousands of km ²)
Over 1000	700	5,000	250
10 - 1000	10,000	1,000	80
0.1 - 10	150,000	150	40
Less than 0.1	Millions	50	30
Total:		6,200	400

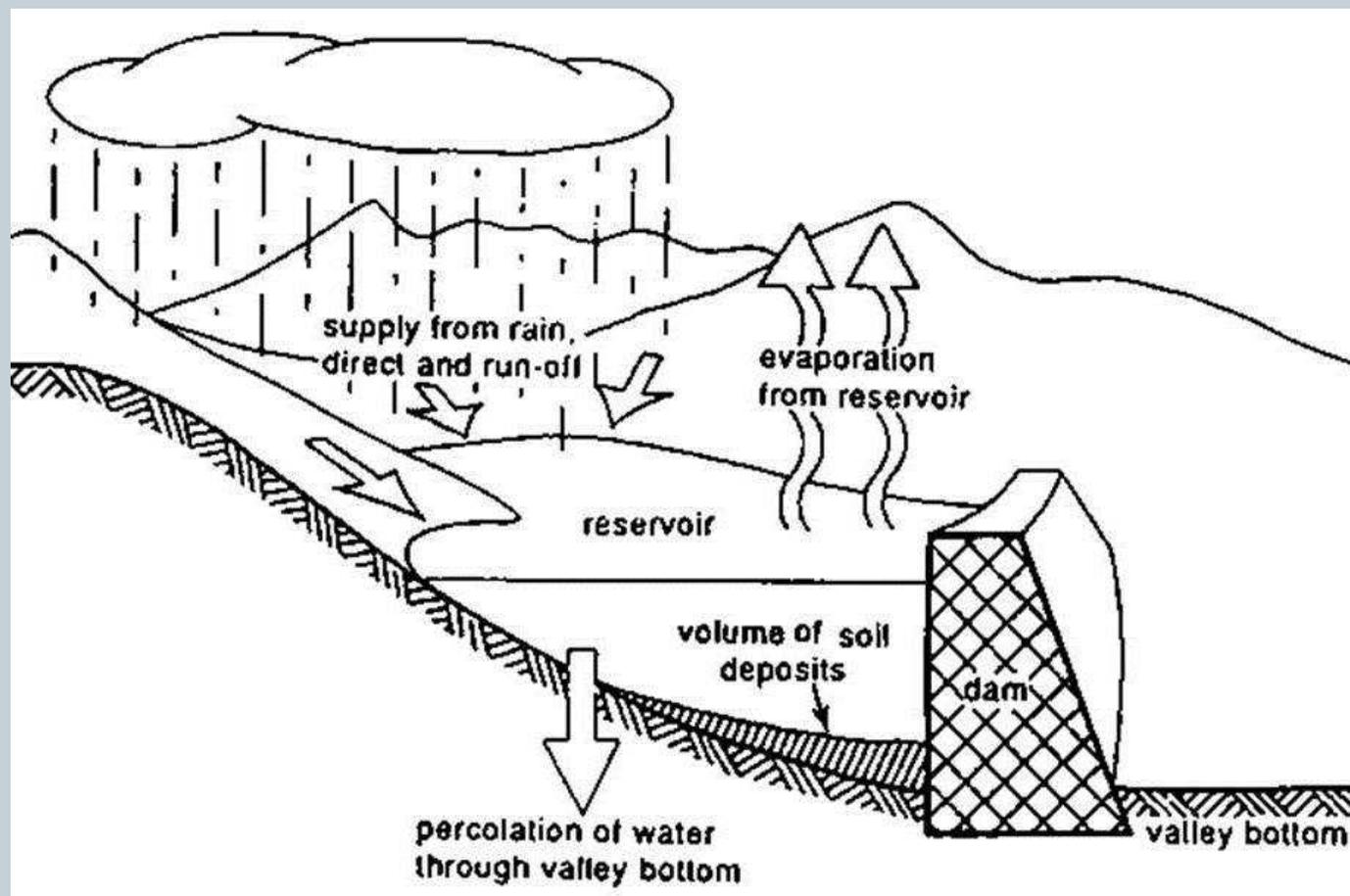
Centinaia di dighe sono state realizzate su grandi fiumi con portate medie tra 1.000 e 20.000 m³/s, mentre qualche migliaio su fiumi con una portata media superiore a 10 m³/s.

La maggior parte delle dighe (small e large) è stata costruita su corsi d'acqua con portate medie annue di 1 m³/s o inferiore.

Serbatoi artificiali: qualche numero

- **1.500 miliardi US\$** di investimenti sostenuti per costruzione di dighe (dati al 2005); il 90% sostenuto dopo il 1950.
- Investimenti annuali pressoché costanti.
- Molte più dighe costruite negli anni '60.
- Negli anni '60 la maggior parte delle dighe veniva costruita nei paesi sviluppati, oggi nei paesi in via di sviluppo.
- Tra il 1995 e il 2005 investimento medio annuo pari a **30 miliardi US\$**.
- Costo unitario per le **large dam** uguale in media a **30milioni US\$** con costi variabili tra **1 milione** e **1 miliardo US\$**.
- L'investimento medio **per m³ di volume** è pari a **\$0.25**; molto inferiore per i grossi schemi idroelettrici ma cresce fino a **1\$** per le dighe con una capacità medio-piccola.

Processi IDROLOGICI nei serbatoi artificiali





L'**idrologia** nella progettazione e gestione degli invasi artificiali

- Dimensionamento della capacità dell'invaso

Modelli di bilancio idrologico

- Dimensionamento degli sfioratori

Modelli di piena (PMF)

1

- Gestione degli invasi

Modelli di bilancio idrologico

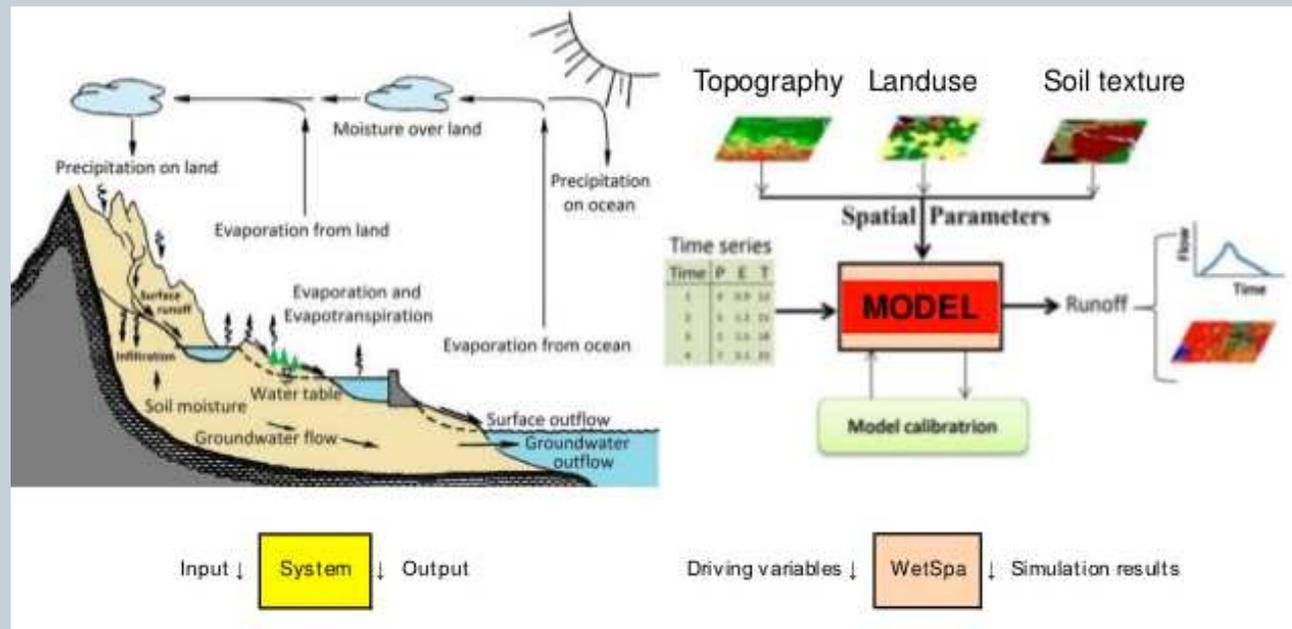
2

- Stima dell'interrimento

Modelli di erosione del suolo

3

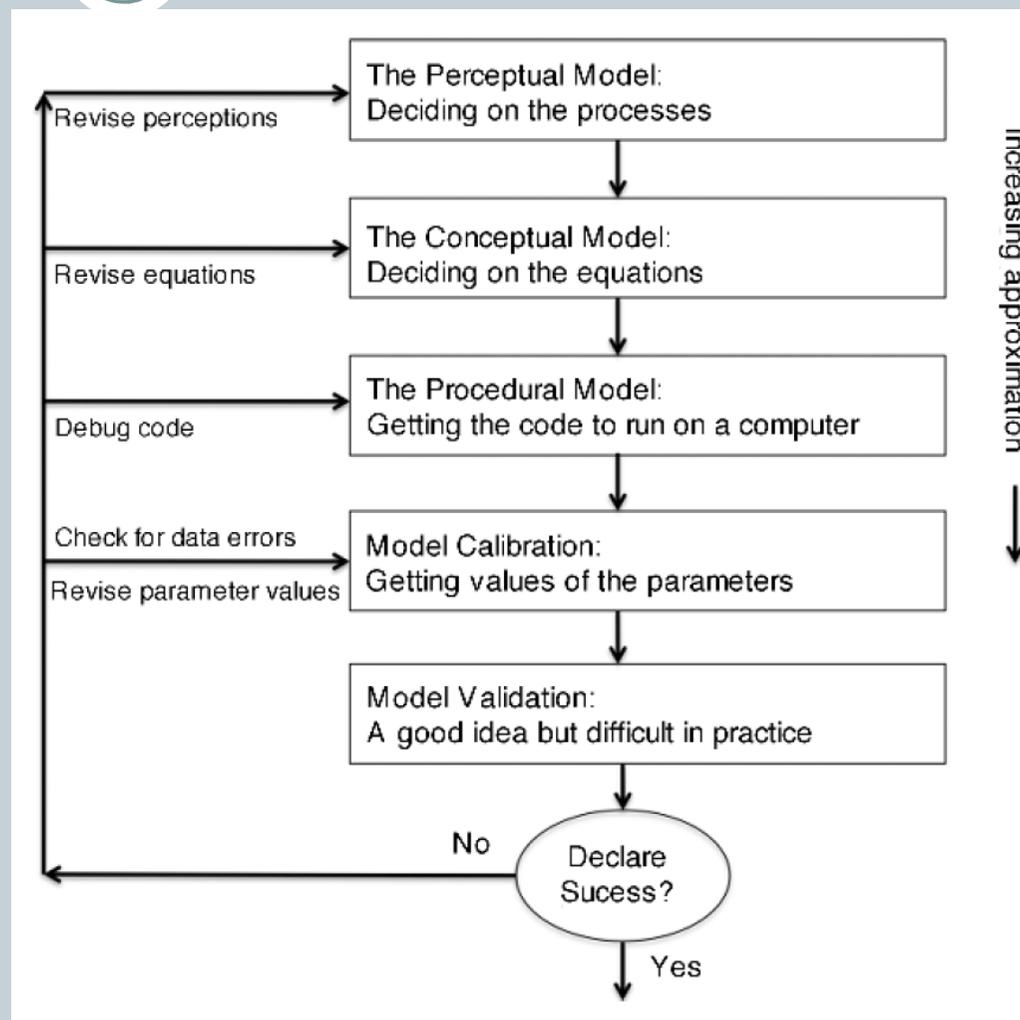
A model is a simplified representation of real world system. The best model is the one which give results close to reality with the use of least parameters and model complexity (Sorooshian et al., 2008)



I modelli sono usati per comprendere e analizzare i vari processi idrologici e per predire il comportamento del sistema.

Definire, costruire e utilizzare un modello idrologico **non è una semplice operazione.**

Fasi della modellazione idrologica (da Beven, 2012)





L'origine dei modelli idrologici può essere collocata nella metà del **XIX secolo** come risposta a tre problemi ingegneristici relativi alla progettazione di:

- (1) fognature urbane,
- (2) sistemi di bonifica
- (3) sfioratori di serbatoi artificiali.

In tutti e tre i problemi la **portata di progetto** era la variabile di maggior interesse.



La **formula (o metodo) razionale** finalizzata a determinare la portata di piena al picco da misure di pioggia (metodo indiretto) deve le sue origini a **Mulvaney (1850)**, un ingegnere irlandese interessato a problemi di bonifica dei suoli.

Fornisce la **portata al picco** ma non il **volume correlato** e ha un significato fisico solo nei **piccoli bacini altamente impermeabili** in cui il deflusso si propaga come un processo puramente cinematico.

Applicazioni del metodo per la progettazione dei sistemi di drenaggio urbano apparirono nella letteratura di fine XIX secolo (Kuichling, 1889; Lloyd-Davies, 1906).

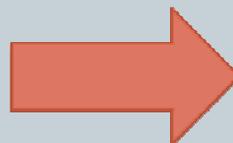


La formula razionale può essere vista come la prima generazione di modelli idrologici in cui la portata al picco Q_p è la **risposta** del sistema, **i** (intensità di pioggia relativa al tempo di corrivazione T_c) è la **forzante** e **A** (area del bacino) e **C** (coefficiente di afflusso) sono i **parametri** del modello.

$$Q_p = C i A$$

In base alle sue assunzioni (intensità e caratteristiche del bacino uniformemente distribuite nello spazio e nel tempo) l'uso della **formula razionale è limitato a piccoli bacini urbani**.

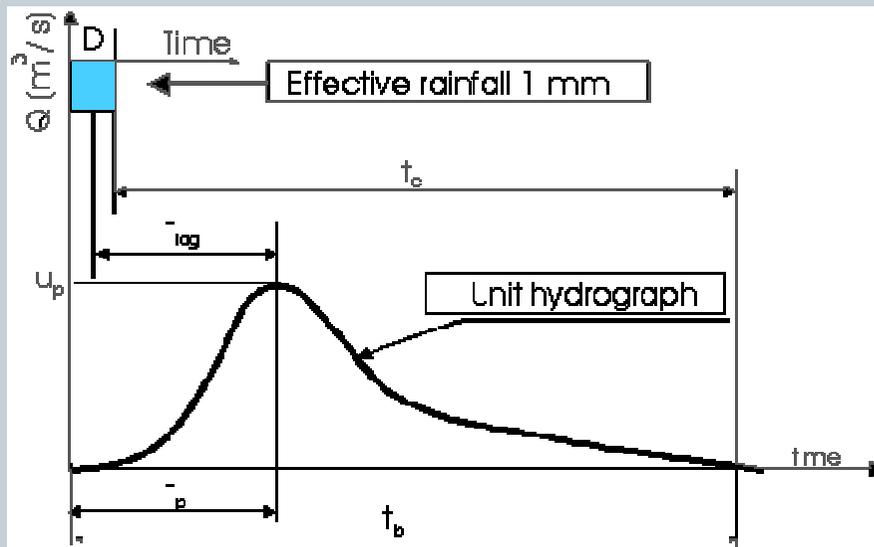
**Necessità di ottenere
uno strumento valido
per i bacini più grandi**



**Modifiche introdotte alla
formula razionale per
superare i limiti dovuti
alle assunzioni di base.**

Il **metodo razionale modificato**, basato sul concetto delle **isocrone**, può essere visto come il primo modello idrologico basato su funzioni di trasferimento la cui forma e i cui parametri erano derivati partendo da mappe topografiche anche tramite l'utilizzo della formula di Manning per il calcolo dei tempi di trasferimento.

Uno dei maggiori avanzamenti nella modellistica idrologica è dovuto all'introduzione del concetto di **Unit Hydrograph UH** introdotto da Sherman (1932) sulla base del principio di sovrapposizione degli effetti.



L'uso dell'UH consente il calcolo dell'intero idrogramma partendo da piogge campionate su intervalli temporali costanti.

Sherman, L.K., 1932. Streamflow from rainfall by the unit graph method. Engineering News Record, IHV, 501 505



L'idrologia si appropria degli approcci propri dell'ingegneria dei sistemi usati per l'analisi dei sistemi dinamici complessi.

Con l'introduzione della teoria dei sistemi l'UH è stato interpretato come la risposta di un sistema dinamico stazionario e lineare dando origine a due diverse forme di UH:

1. la **risposta impulsiva** di un sistema lineare = **IUH instantaneous unit hydrograph**
2. la **risposta a un input definito** su un intervallo di tempo discreto conosciuto = **finite period unit hydrograph (TUH)** (O Donnell, 1966).

L'uso di tecniche matematiche come trasformate di Laplace e Fourier poteva portare alla derivazione della funzione di risposta partendo dai dati di pioggia e portata.

La derivazione dell'UH in forma discreta a partire dai dati campionati (**problema inverso**) rimane negli anni '50 ancora un problema importante a causa **del comportamento particolarmente non lineare del sistema** e degli **errori ampi dei dati di input e output**.

Per risolvere questo problema gli idrologi trovarono che la forma dell'UH poteva essere ricavata sulla base della **soluzione di equazioni differenziali più o meno semplificate**, come quelle che descrivono la dinamica dei volumi immagazzinati in un serbatoio lineare.

Sviluppo di un'ampia varietà di soluzioni: **cascata di serbatoi lineari** (Modello di Nash, 1958, 1960), **canali lineari, canali lineari e serbatoi lineari, serbatoi non lineari** (Prasad, 1967).

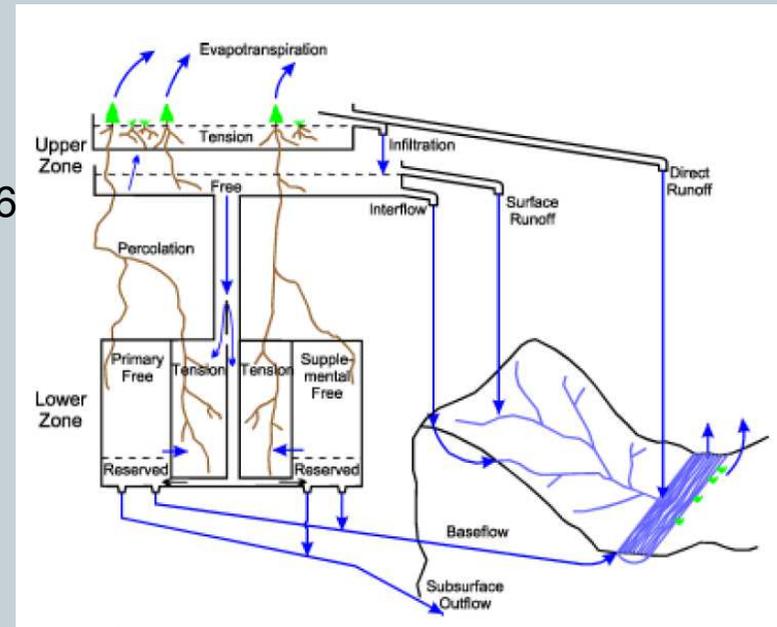
Pieno sviluppo dei modelli concettuali

Cercando una maggiore interpretazione fisica dei singoli processi idrologici, i modelli sono stati creati tramite composizione di un numero di elementi concettuali ognuno dei quali rappresenta un particolare aspetto/processo.

Sviluppo di diversi modelli:

- Dawdy and O'Donnell (1965)
- Stanford Model IV (Crawford and Linsley, 1966)
- **Sacramento Model (Burnash et al., 1973)**
- HBV model (Bergström and Forsman, 1973)
- Tank model (WMO, 1975)

**Explicit Soil Moisture
Accounting (ESMA) models**



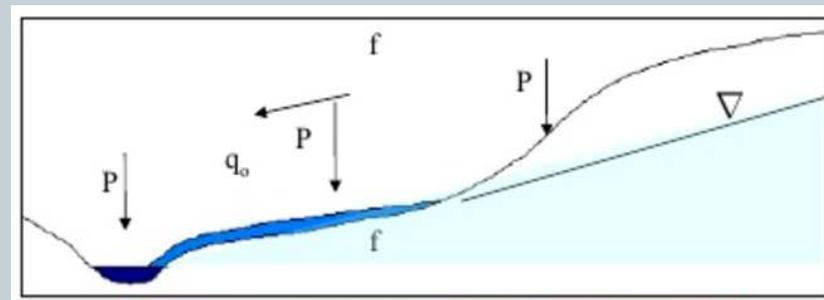
Nascita dei modelli ad area contribuente

Alla fine degli anni '70 viene introdotto un nuovo tipo di modello **lumped** basato sull'idea che la formazione del deflusso superficiale è dominato dalla dinamica delle aree sature (**meccanismo dunniano** – Dunne, 1978).

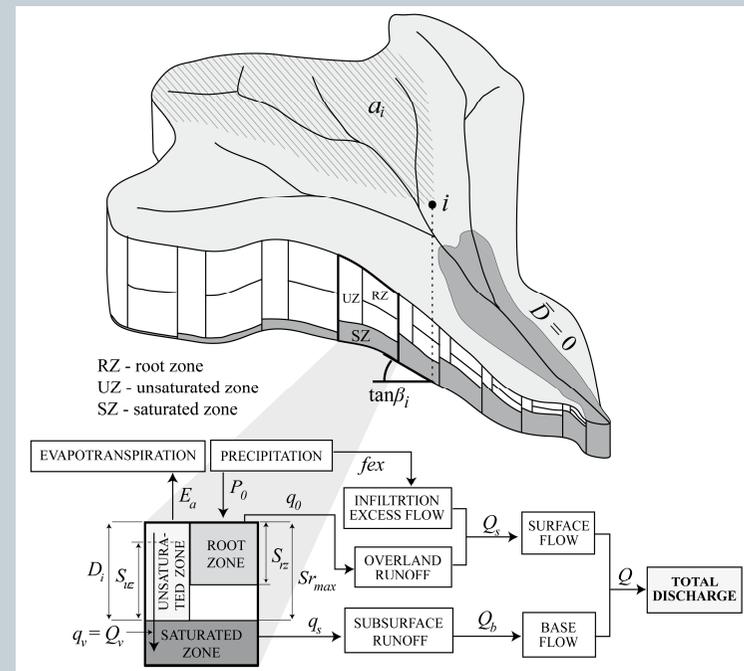
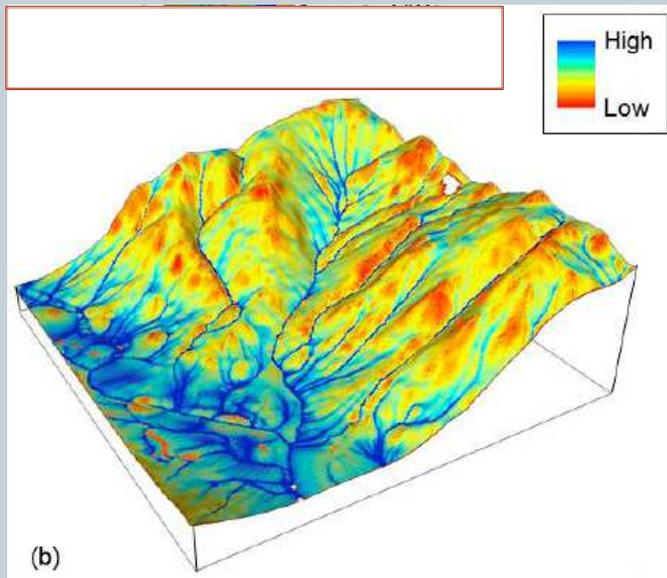
Sviluppo di diversi modelli:

- Probability Distribution Model (PDM) (Moore & Clarke, 1981)
- Xinanjiang Model (Zhao, 1977)
- ARNO model (Todini, 1996)
- Variable Infiltration Capacity (VIC) (Liang et al., 1994)

**Variable Contributing Area
(VCA) models**



Uno dei modelli più importanti sviluppati alla fine degli anni '70 è il **TOPMODEL** (Beven and Kirkby, 1979) basato sul meccanismo di formazione *dunniano* e sull'idea che la morfologia eserciti un ruolo dominante sulla formazione del deflusso superficiale.

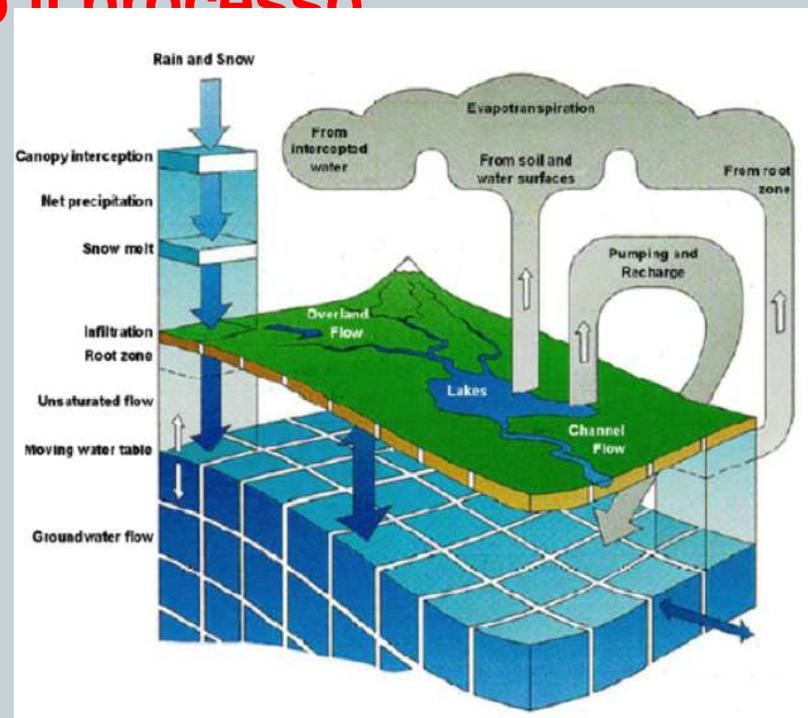


Tendenza sempre maggiore a un miglioramento della rappresentazione dei processi idrologici.

Passaggio dalla rappresentazione concettuale all'equazione/i che governa/no il processo

Integrazione numerica dei sistemi di equazioni che descrivono il moto dell'acqua in superficie nel saturo e nell'insaturo.

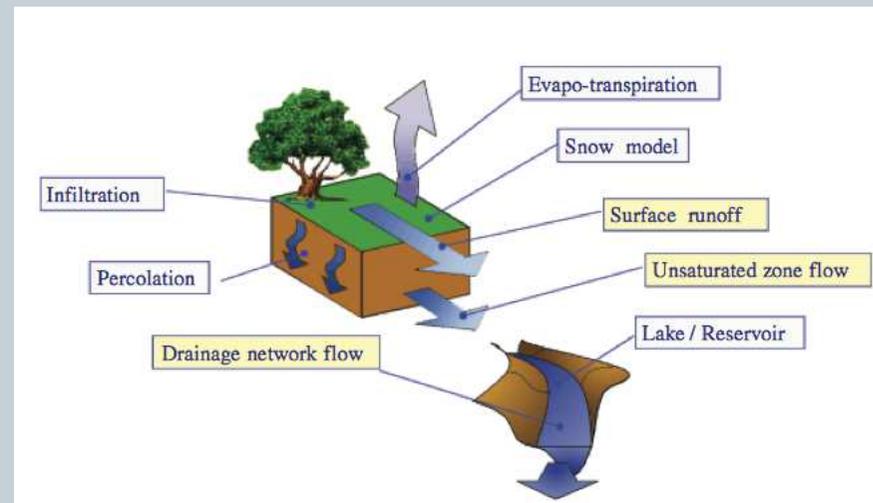
SHE (Systeme Hydrologique European) (Abbott et al. 1986a, b)
Danish Hydraulic Institute (DK), Institute of Hydrology at Wallingford (UK) and SOGREAH (France).



Una sempre più ampia disponibilità di **informazione spazialmente distribuita** (uso dei suoli, pedologia, litologia, **meteo radar**) ha facilitato lo sviluppo di modelli distribuiti e a base fisica. Basati su **grid o mesh triangolare**.

Sviluppo di diversi modelli:

- MIKE SHE (Refsgaard & Storm 1995)
- **TOPKAPI** (Todini 1995)
- LISFLOOD (De Roo et al. 1998, 2000)
- TETIS (Velez 2001; Francés et al. 2007).
- DHVSM (Wigmosta et al., 1994)
- tRIBS (ivanov et al., 2004)



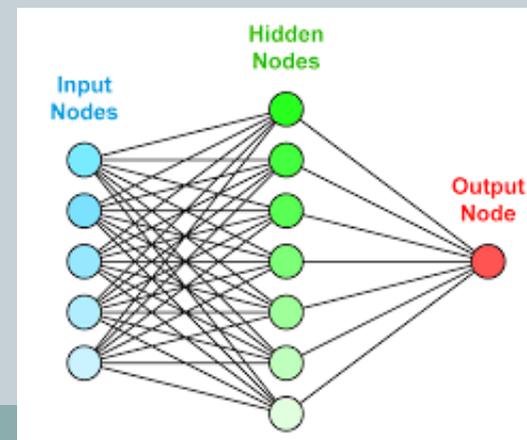
Sviluppo dei modelli stocastici

Box and Jenkins (1970) hanno fornito agli idrologi la famiglia dei modelli autoregressivi (ARMA) e altre forme di modelli stocastici per la generazione di variabili idrologiche.

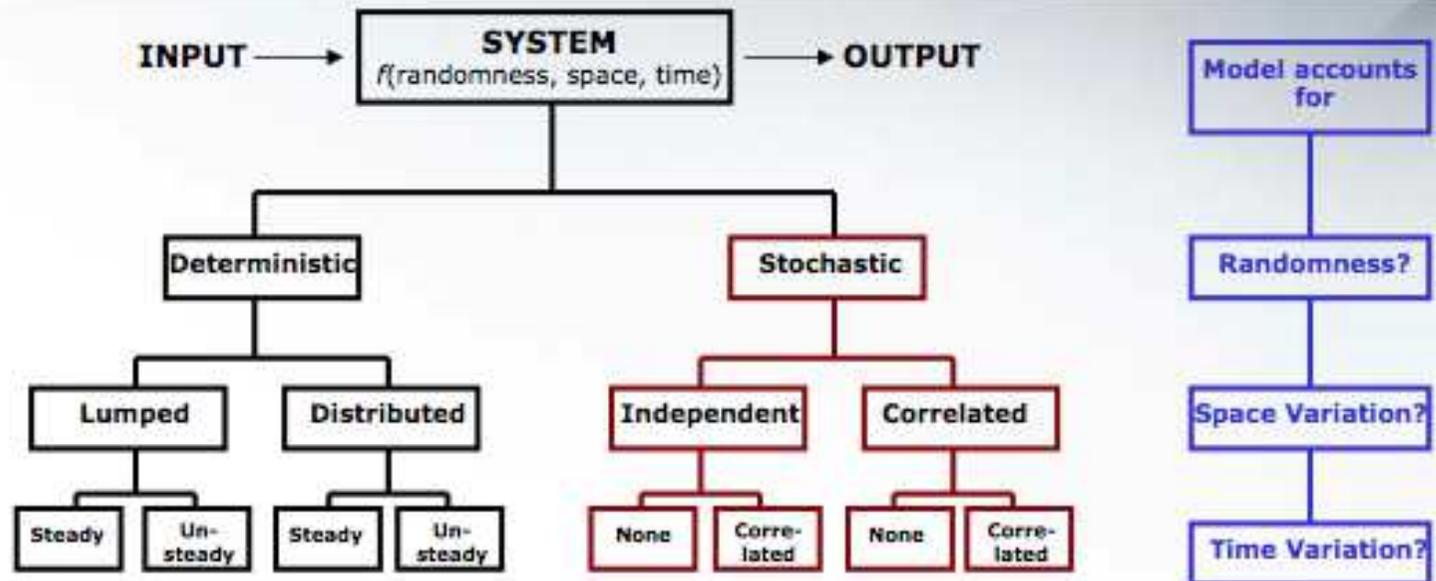
Sviluppo dei modelli data-driven

Introduzione di modelli molto efficienti e parsimoniosi dal punto di vista computazione a scapito di una forte perdita del significato fisico del modello stesso.

**Modelli basati su
Artificial Neural Network**



Classificazione dei modelli idrologici



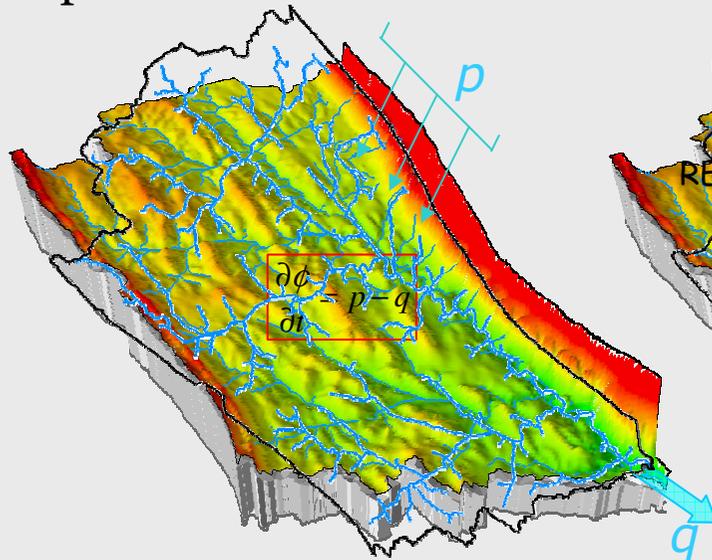
Classification according to:

- Process Description (deterministic, conceptual, stochastic)
- Domain Representation (lumped, semi-distributed, distributed)
- Temporal Scale (annual, monthly, daily, hourly, etc.)
- Solution Technique and Model Application

Modelli lumped vs. distribuiti

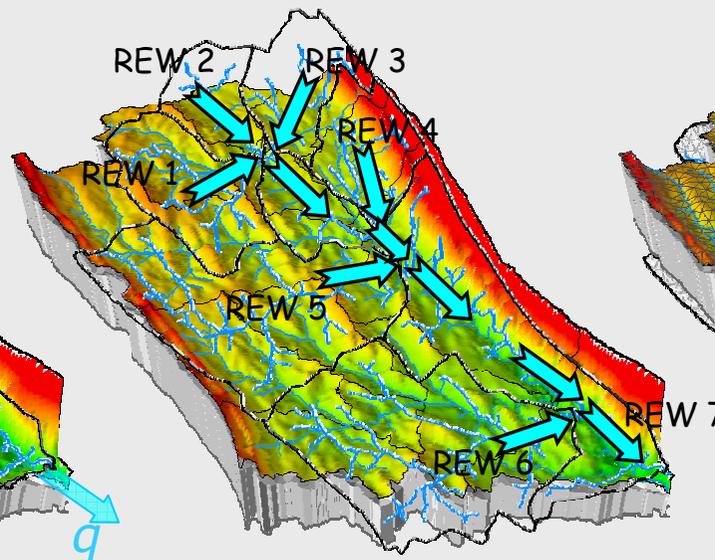
How ? Formalization of hydrologic process equations

umped Model



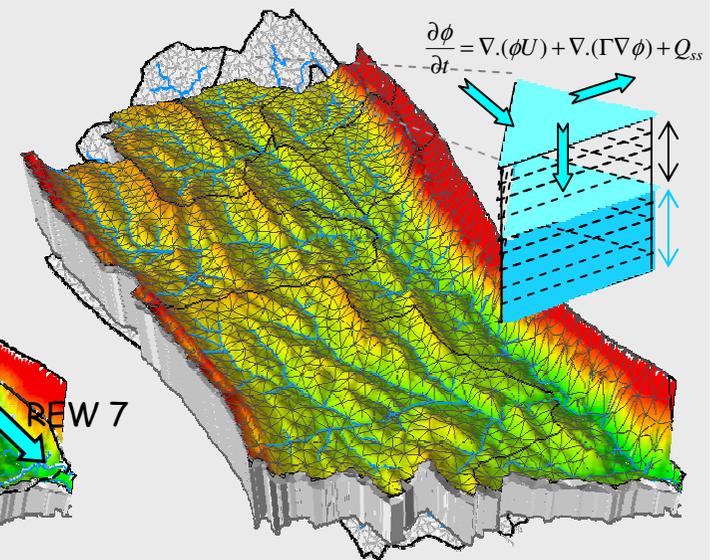
e.g: Stanford Watershed Model

Semi-Distributed Model



e.g: HSPF, LASCAM

Distributed Model



e.g: ModHMS, PIHM, FIHM, InHM

Process Representation:

Parametric

Physics-Based

Predicted States Resolution:

Coarser

Fine

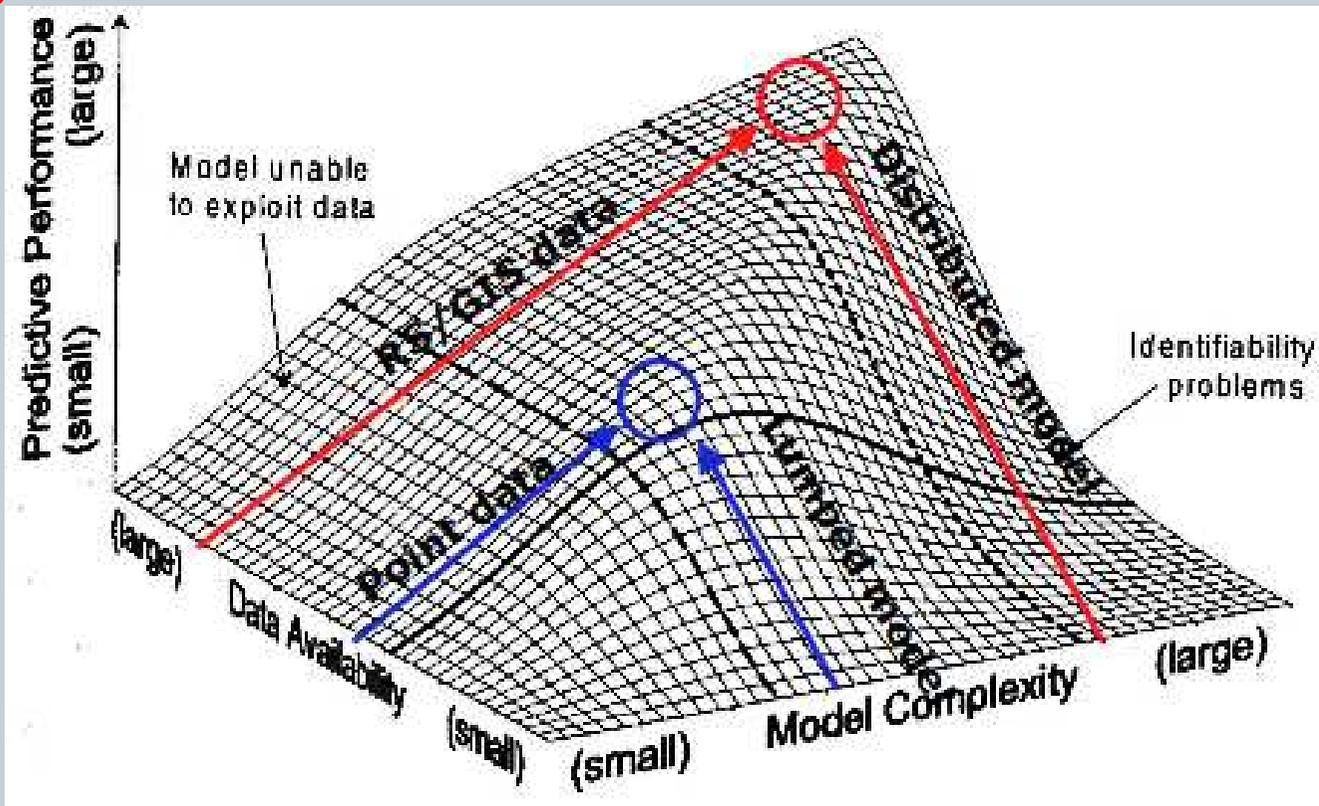
Data Requirement:

Small

Large

Computational Requirement:

How much Complexity is Needed in a Hydrologic Model?



1. Problemi connessi alla stima della portata di progetto



Nel progettare le opere di sfioro è necessario stimare portata massima per fissato **tempo di ritorno** (1000 anni).

Metodi indiretti

1. Stima delle piogge di progetto per fissato T_P
2. Uso di un modello idrologico:
 - a) Stima delle perdite idrologiche
 - b) Modello di trasferimento
3. Derivazione dell'idrogramma di piena per fissato tempo di ritorno T_Q

Assunzione (implicita) -> $T_Q = T_P$

(Packman and Kidd, 1980; Bradley and Potter, 1992).

1. Problemi connessi alla stima della portata di progetto



Molti idrologi hanno evidenziato che **questa assunzione** non è verificata e che **può portare a grossi errori nella stima della portata di progetto** (Linsley et al., 1988, p. 365).

Pilgrim and Cordery (1975, p. 81) “*The actual relationship between the frequencies of the design rainfall and the derived flood is obscure as each part of the overall design model introduces some joint probability*”.

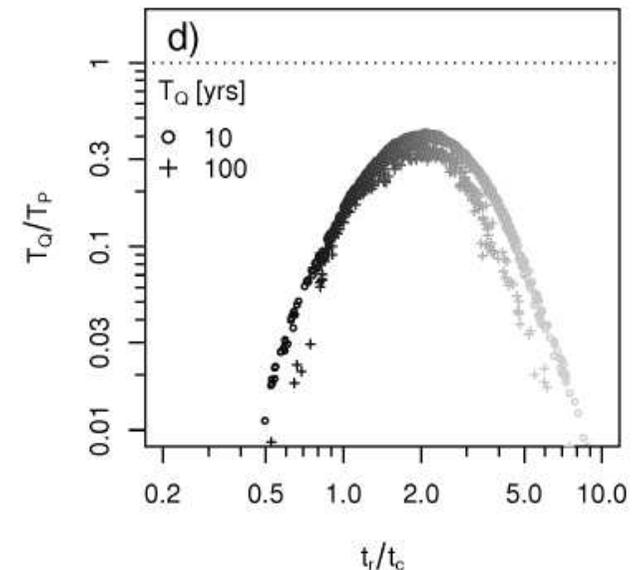
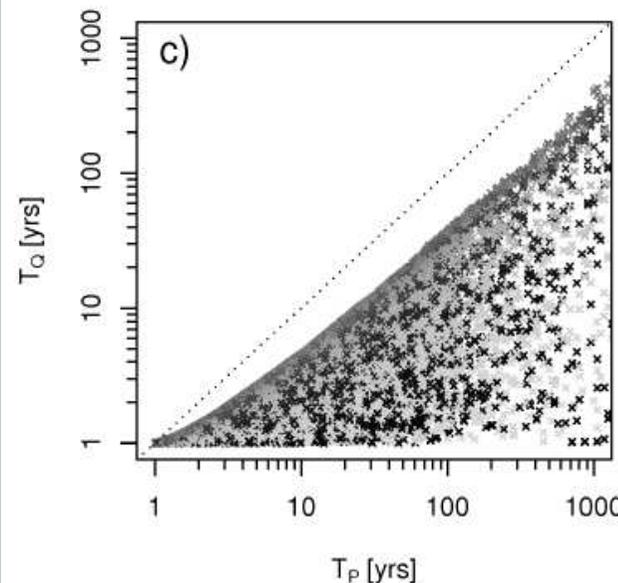
Le parti che devono essere considerate includono la **durata della pioggia**, la sua **intensità media**, la **distribuzione temporale e spaziale** e le **condizioni di umidità antecedenti**.

1. Problemi connessi alla stima della portata di progetto

Molti idrologi hanno evidenziato che **questa assunzione** non è verificata e che **può portare a grossi errori nella stima della portata di progetto** (Linsley et al., 1988).

Viglione e Bloesch (2009)

Effetto della durata della pioggia t_r rispetto al tempo di concentrazione t_c



Monte-Carlo simulation (20.000 simulated years).

Grey-scale of points represents storm durations (dark points are short storms).

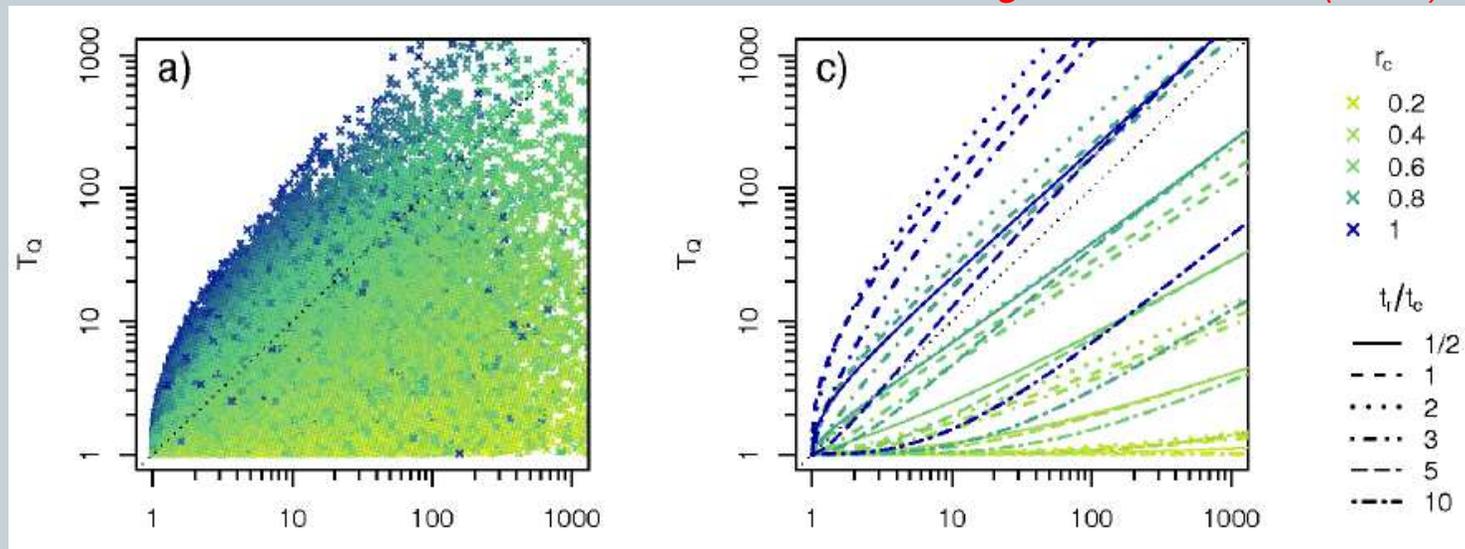
Flood return periods 8-13 yrs labelled as 10 yrs and those 50-200 yrs labelled as 100 yrs.

1. Problemi connessi alla stima della portata di progetto

Molti idrologi hanno evidenziato che **questa assunzione** non è verificata e che **può portare a grossi errori nella stima della portata di progetto** (Linsley et al., 1988).

Viglione e Bloesch (2009)

Effetto del coefficiente di afflusso



Monte-Carlo simulation (20.000 simulated years).

Events characterized by high r_c in **dark-blue** while low r_c events in **light-green**.

1. Problemi connessi alla stima della portata di progetto



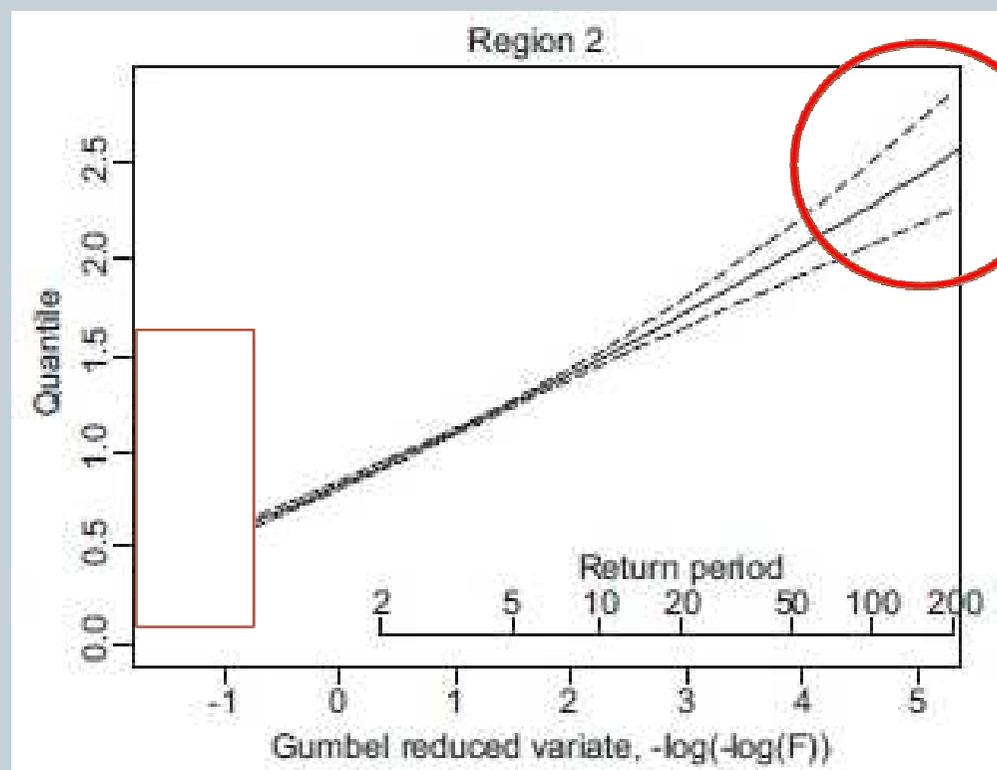
Soluzione al problema?

1. Metodi diretti (**analisi probabilistica delle portate** ove possibile)
2. **Modellazione idrologica complessa:**
 - a) **Simulazione stocastica** di piogge (generatori climatici) generare N anni di piogge
 - b) **Modello idrologico** (simulazione in continuo) scala temporale oraria!
 - c) **Analisi probabilistica delle portate** simulate (portata di progetto per fissato T_Q)
3. Ricordare che T_P può essere diverso da T_Q !
4. Tenere in considerazione tutte le **incertezze** che comunque caratterizzano la stima della portata sia con metodi diretti che indiretti.

1. Problemi connessi alla stima della portata di progetto



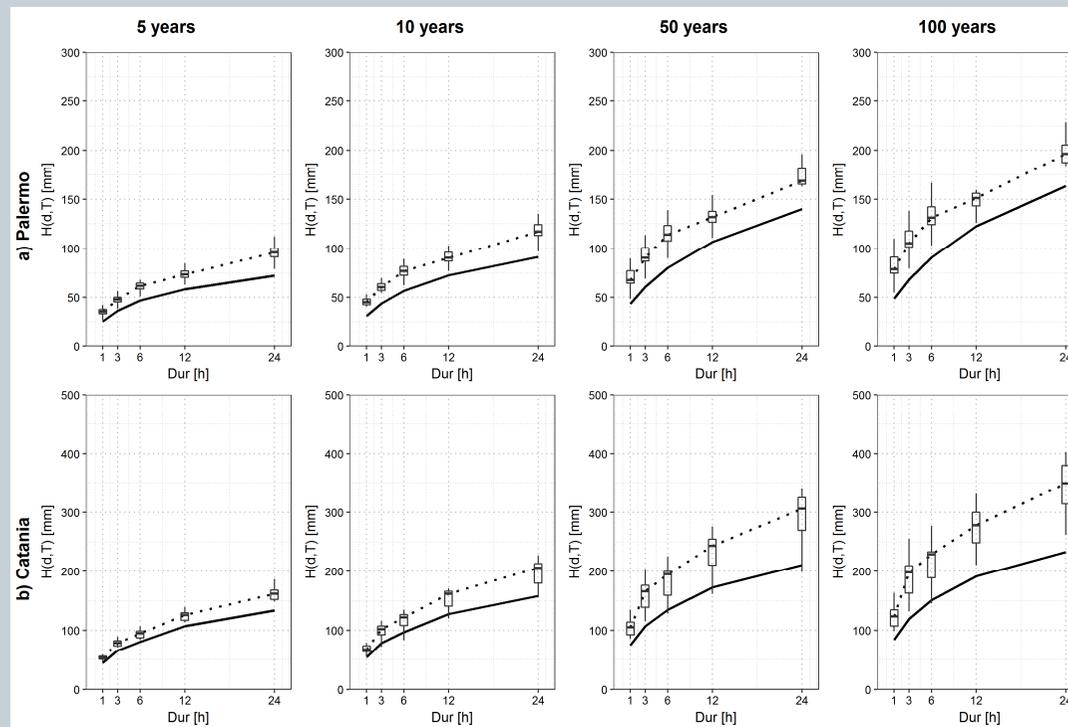
Incertezza sulle piogge di progetto



Stimare piogge per fissata durata e $T > 50-100$ anni è una procedura caratterizzata da elevate incertezze (estrapolazione statistica)

1. Problemi connessi alla stima della portata di progetto

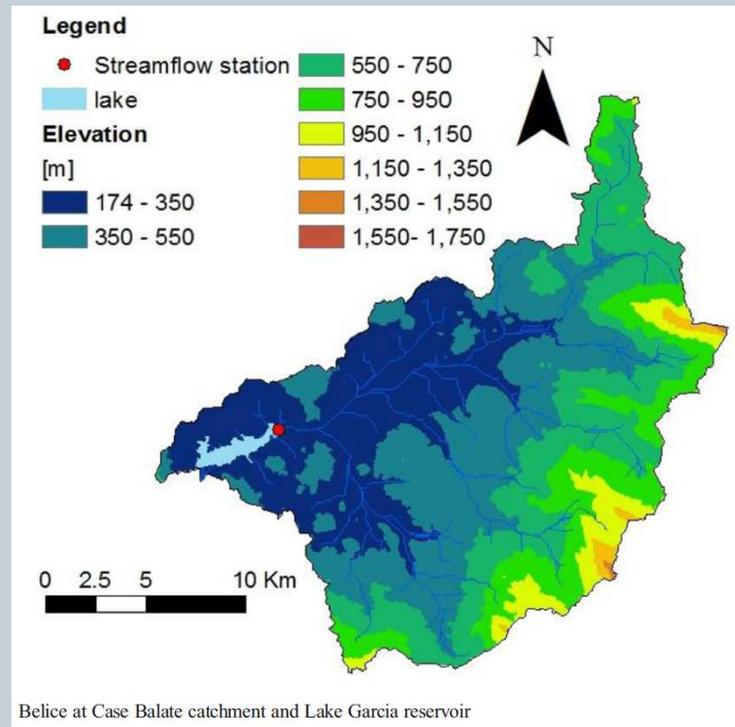
Approccio stazionario sulle forzanti meteoriche



Alcuni stati europei hanno già introdotto appositi suggerimenti nelle proprie linee guida nazionali, prevedendo di **amplificare le piogge di progetto** di un'aliquota in alcuni casi anche del **40%** per le previsioni al **2100**.

2. Gestione dei serbatoi artificiali e climate change

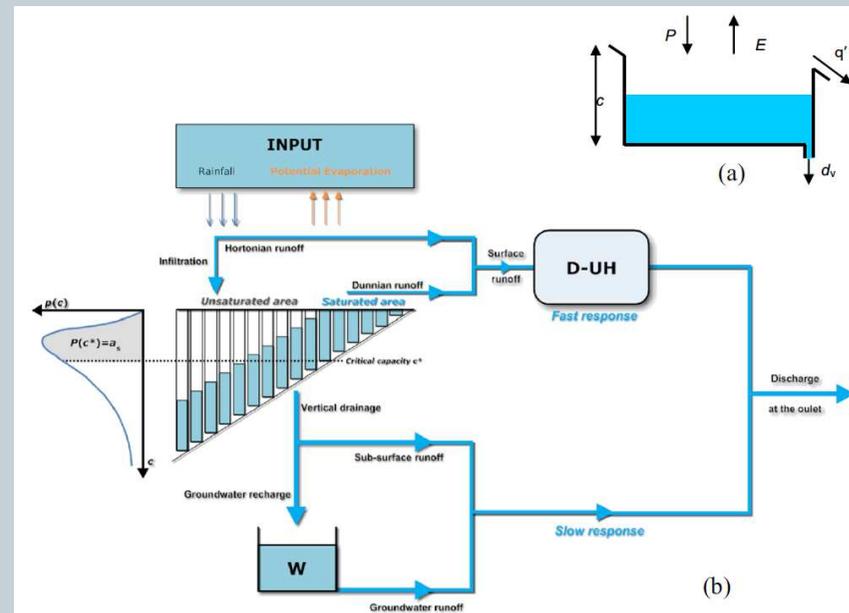
Arnone et al., 2015



Invaso Garcia

current active capacity = 63 Mm³
(total capacity of 80 Mm³)

Modello TOPDM (Noto, 2014)



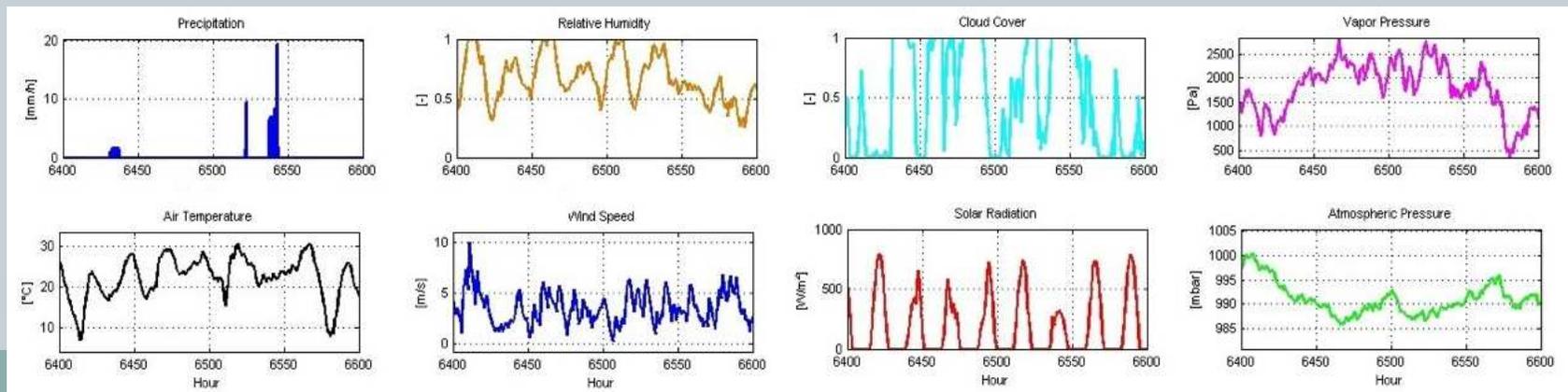
Effetti del climate change su affidabilità e soddisfacimento del target idrico dell'invaso.

2. Gestione dei serbatoi artificiali e climate change

AWE-GEN (Advanced **WE**ather **GEN**erator) (Fatichi *et al.*, 2009) is an **hourly** weather generator capable of:

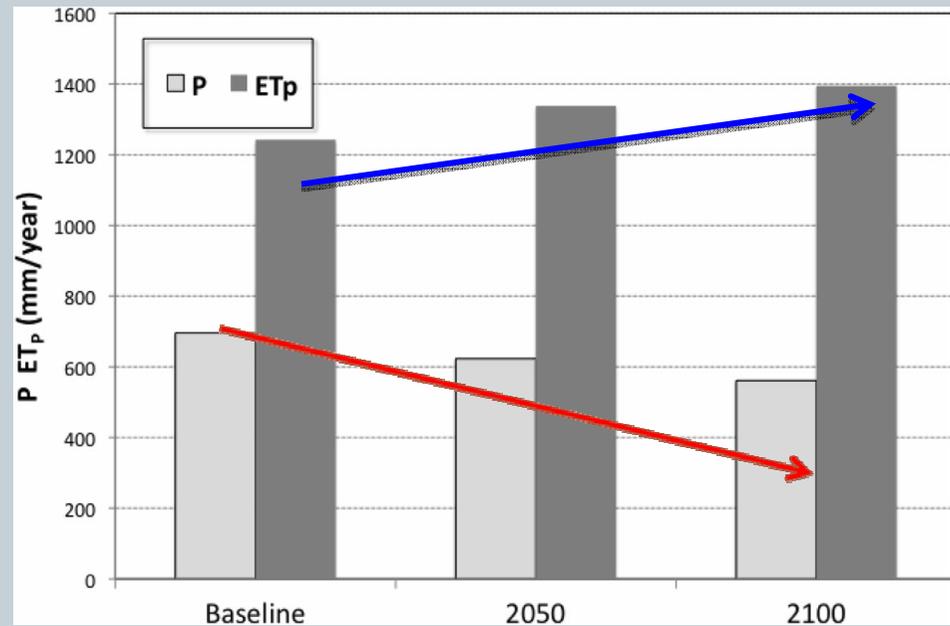
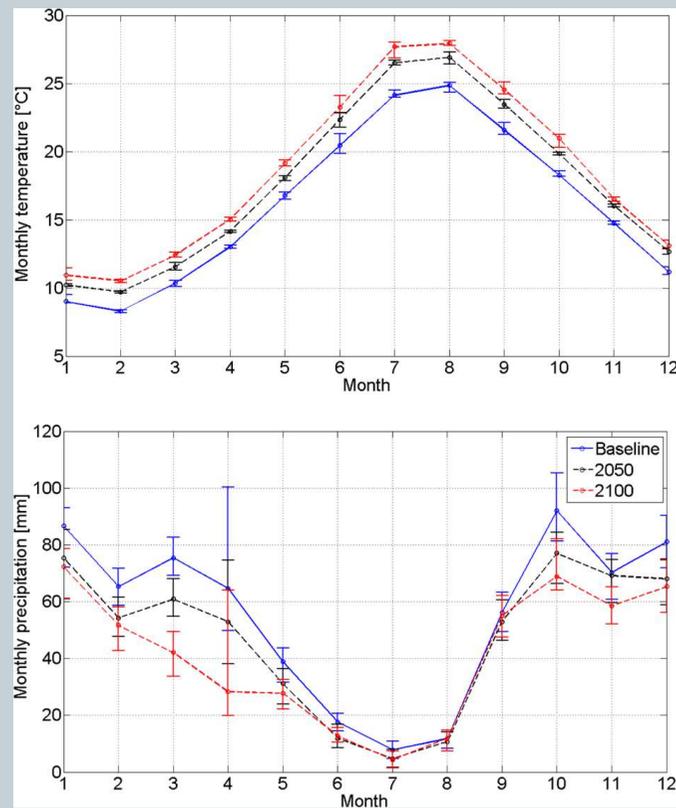
- reproducing low and high-frequency characteristics of hydro-climatic variables and their statistical properties
- simulating **vapor pressure**, **wind speed**, **atmospheric pressure** and **shortwave radiation**
- simulating the **inter-annual variability of the precipitation** process and a wide set of statistics including **rainfall extremes**
- taking into account **non-stationary change of climate (climate change)**

AWE-GEN employs both the **physically-based** and the **stochastic approaches**



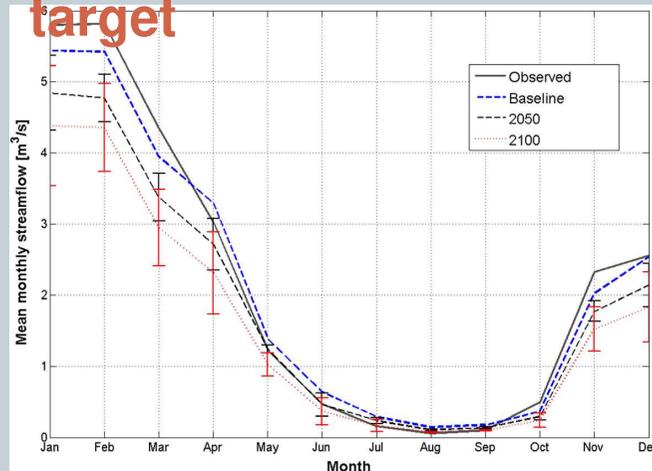
2. Gestione dei serbatoi artificiali e climate change

Three climate scenarios have been created and investigated, **Baseline** (current climate), and the climate projections at **2050** and **2100**.



2. Gestione dei serbatoi artificiali e climate change

Analisi soddisfacimento-target



Monthly discharge

V_{new}

Ipotetico volume che permette di mantenere inalterato R_v

Target reduction

Riduzione del target prefissato

Bilancio idrico del serbatoio

$$S_t = S_{t-1} + Q_{t-1,t} - E_{t-1,t} - R_{t-1,t}$$

The reliability of a system is defined as *the probability that a system will perform the required function for a specified period of time under stated conditions* (Chow et al. 1988).

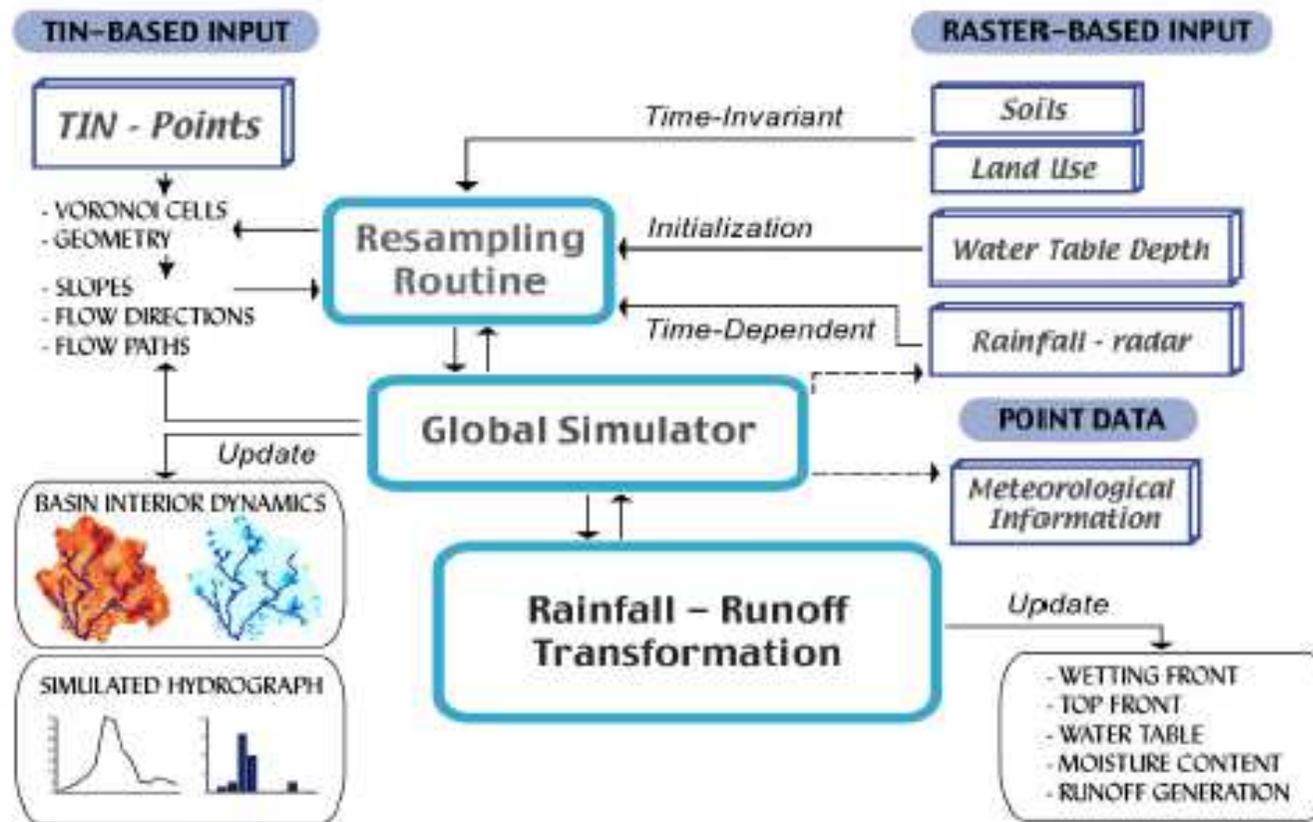
R_v is the complement of probability of failure, i.e. the probability that the “demand” will exceed the “capacity”

Scenario	R_v	V_{new} [Mm ³]	Target reduction
Baseline	0.929	–	–
P2050	0.899	69	5.69 %
P2100	0.775	>100	19.24 %
ET2050	0.882	70	7.49 %
ET2100	0.874	87	8.38 %
PET2050	0.847	98	11.36 %
PET2100	0.704	>100	27.02 %

3. Modellazione della produzione di sedimenti

tRIBS - TIN Real-Time Integrated Basin Simulator

- Intercettazione
- Evapotraspirazione
- Infiltrazione
- Dinamica dell'acquifero
- 4 diversi processi di formazione del deflusso superficiale
- Processi di trasferimento (Ivanov et al., 2004)

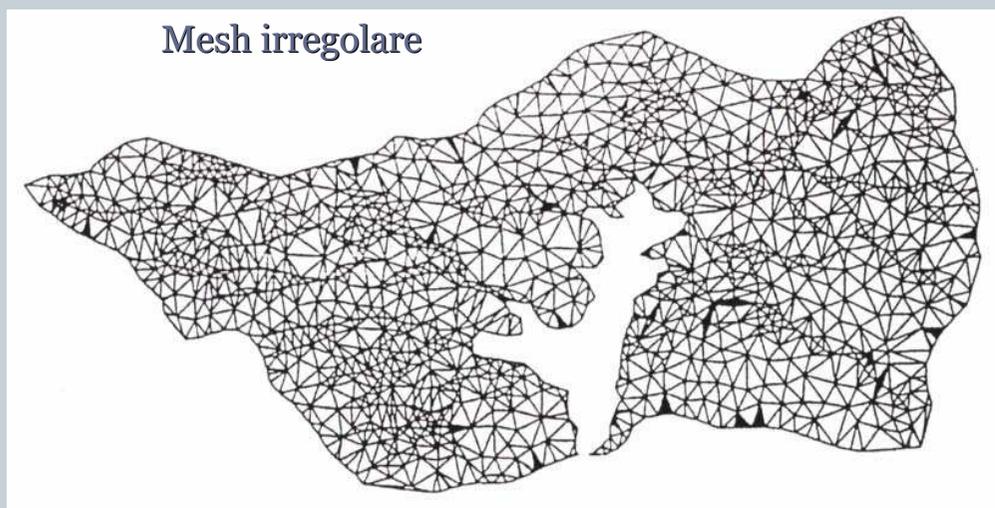
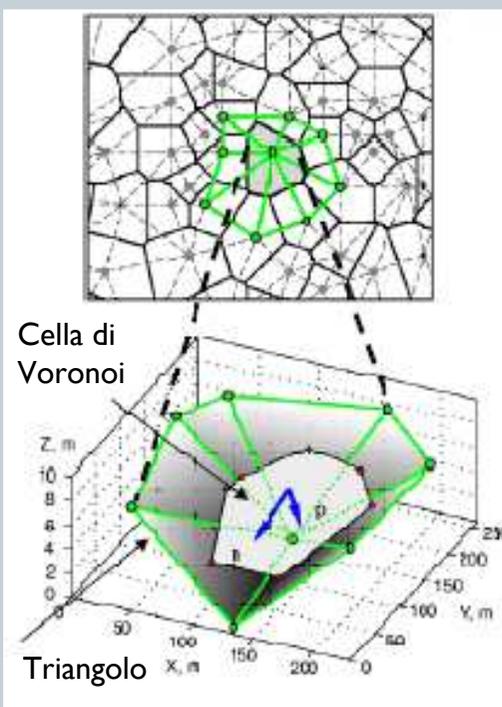


Componente erosiva (Francipane et al., 2011; 2014)

Componente stabilità di pendii (Arnone et al., 2011; 2014; 2016)

3. Modellazione della produzione di sedimenti

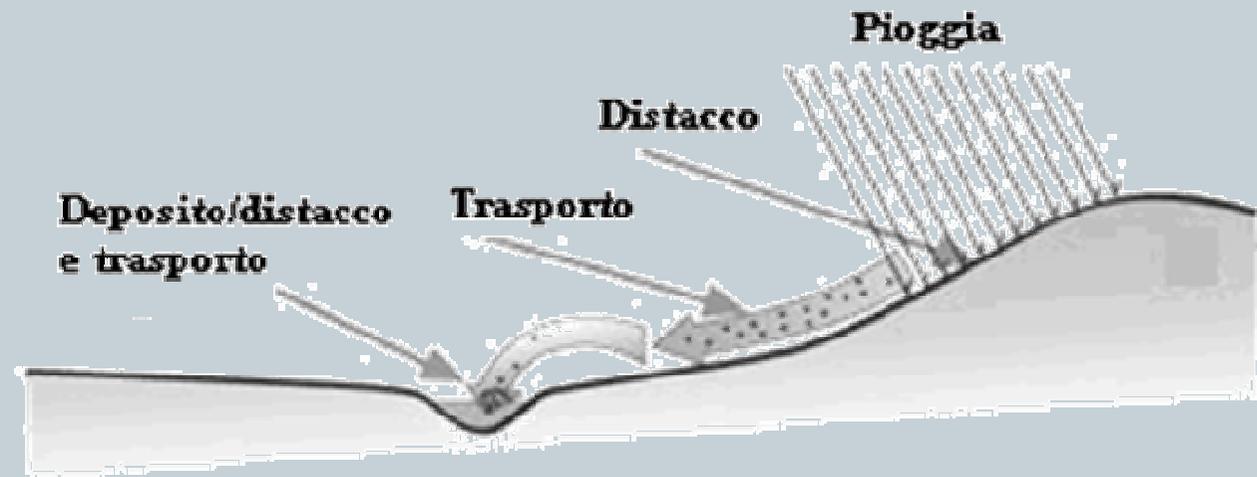
- Rappresentazione della superficie tramite modelli TIN (Triangular Irregular Network) a mesh irregolare
- Utilizzo della cella di Voronoi come volume di calcolo

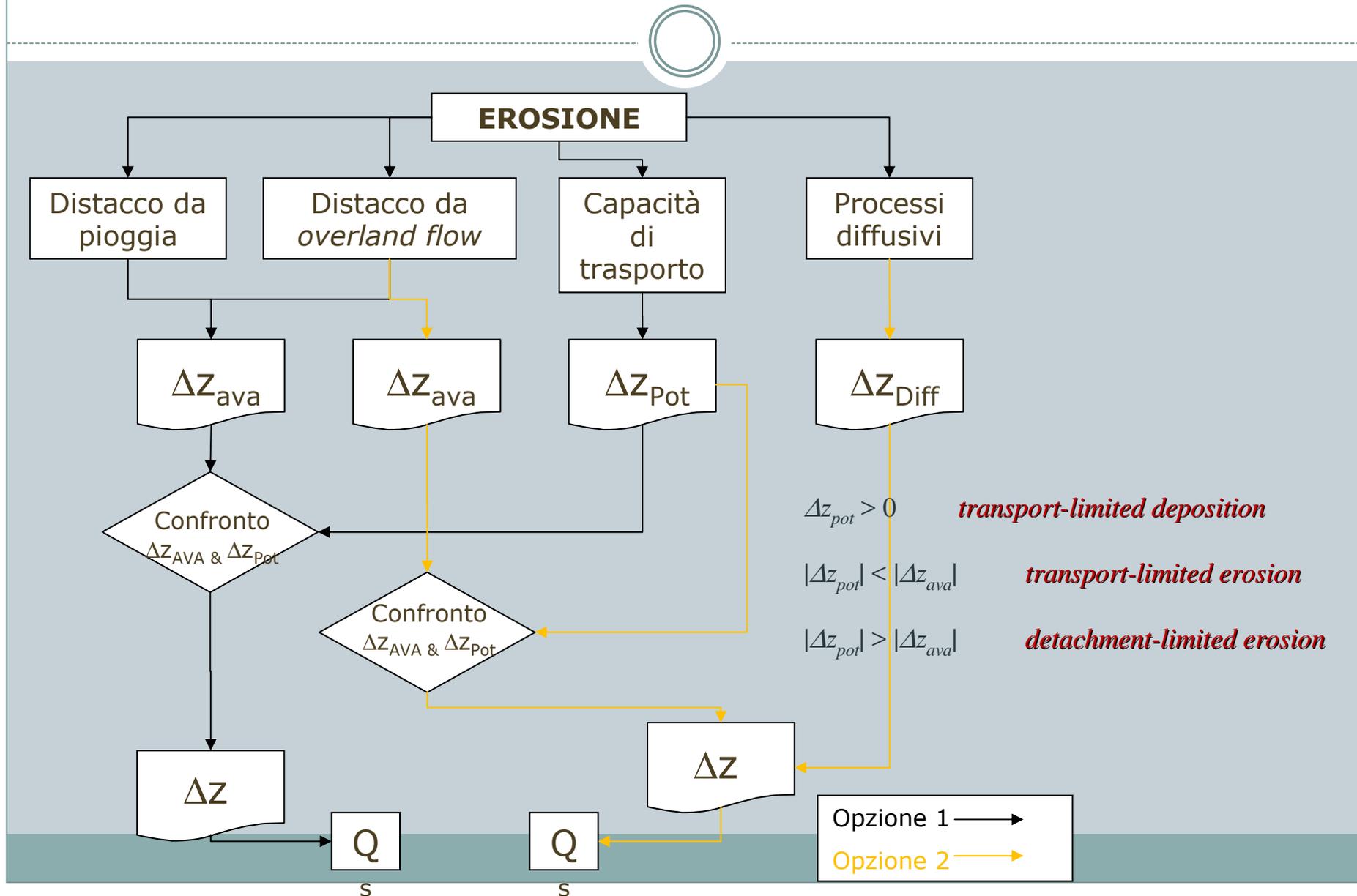


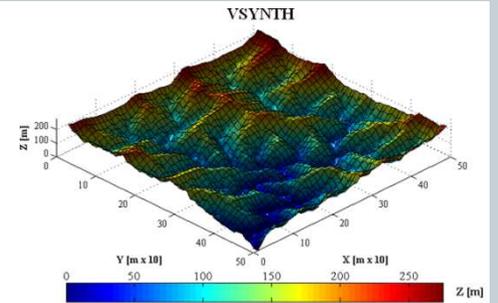
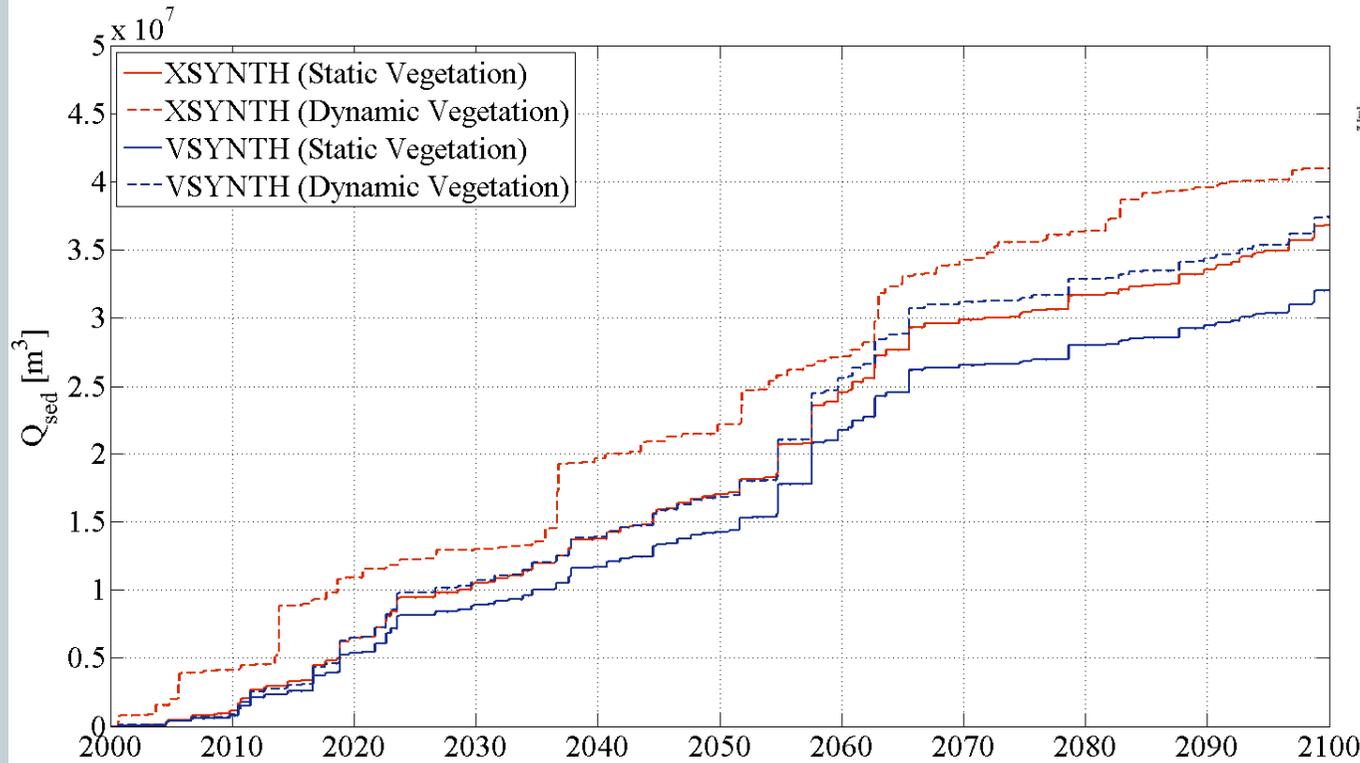
3. Modellazione della produzione di sedimenti

Il **modulo erosivo** simula i processi di distacco e deposito lungo i versanti ed i canali:

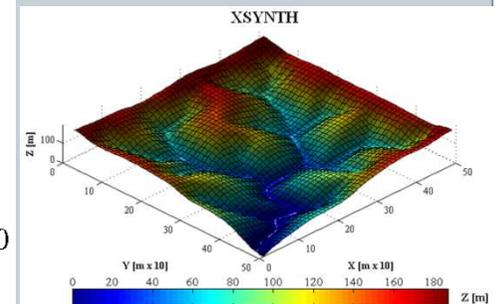
- 1a - Erosione da impatto (*raindrop impact*)
- 1b - Erosione da *overland flow*
- 2 - Movimenti di massa (*processi diffusivi*)







- Short hillslopes
- Steep slopes
- **Fluvial erosion**



- Long hillslopes
- Shallow slopes
- **Diffusive erosion**

Sediment yield m^3/year 2000-2100

AWE-GEN data



- Evidenziare limiti e difficoltà della determinazione delle portate di progetto.
- Utilizzo di modelli più aggiornati per la gestione dei serbatoi artificiali.
- **(Ri)conciliare l'idrologia tecnica con l'idrologia scientifica!**



Società Idrologica Italiana
Italian Hydrological Society

Giornate dell'Idrologia 2017



LE GIORNATE DELL'IDROLOGIA DELLA SOCIETÀ IDROLOGICA ITALIANA 2017

EVENTI IDROLOGICI ESTREMI IN UN AMBIENTE CHE CAMBIA

Favignana (Tonnara Florio) , 21-23 giugno 2017

Alluvioni

Scenari di rischio e valutazione del danno, Rischio accettabile, resilienza e protezione, I piani di gestione del rischio da alluvione, Le alluvioni in ambienti urbani, Strategie di adattamento ai cambiamenti climatici e mitigazione del rischio di alluvioni

Frane

Frane attivate da precipitazione: processi fisici e meccanismi, Cambiamenti climatici e dissesto idrogeologico, Il ruolo della vegetazione sulla stabilità dei versanti, Avanzamenti nel monitoraggio delle variabili idrologiche e climatiche, Prevenzione e mitigazione del rischio di frane

Siccità

Nuove frontiere del monitoraggio delle siccità, Strumenti di policy e operativi per la mitigazione del rischio di siccità, Valutazione della vulnerabilità dei sistemi idrici e strategie di adattamento, Gestione del rischio di siccità dei sistemi idrici

Comitato organizzatore

Prof. Ing. Giuseppe T. Aronica, UNIME
Prof. Ing. Antonio Cancelliere, UNICT
Prof. Ing. Leonardo Valerio Noto, UNIPA
Ing. Brunella Bonaccorso, UNIME
Ing. David J. Peres, UNICT
Ing. Dario Pumo, UNIPA

Registrazione

Nessuna quota di iscrizione.
Adesione come socio alla **Società Idrologica Italiana** mediante il pagamento della quota annuale, il cui costo è di 20 €.

Previsti CFP con Ordine Ingegneri PA, TP, CT



Köszí

Takk

Kiitos

mahalo

mauruuru

danke

Merci

Thank
you

Děkuju

Dank U

Grazie

Dziękuję

Obrigado

cnacubo

Gracias