Politecnico di Bari



Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe
ITCOLD - Italian Committee on large Dams
YPF - Young Professional Forum ITCOLD

DICATECh

OPEN DAY ON DAMS ITCOLD 2025

IMPIANTI E MODELLI PER LA GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE

NUOVI SCENARI PER LE VALUTAZIONI IDROLOGICHE

Ing. Vincenzo Totaro
Politecnico di Bari - DICATECh

Ing. Alessia Colagiero
Arkè ingegneria s.r.l.

LE GRANDI DIGHE IN ITALIA

In **Italia, il DGD gestisce attualmente 528 grandi dighe.**

La funzione primaria di oltre la metà degli invasi italiani, concentrati principalmente nella regione alpina, è la produzione di energia idroelettrica.

Circa il 10% delle dighe è destinato all'irrigazione,

in particolare nelle regioni centrali e meridionali, mentre una percentuale minore

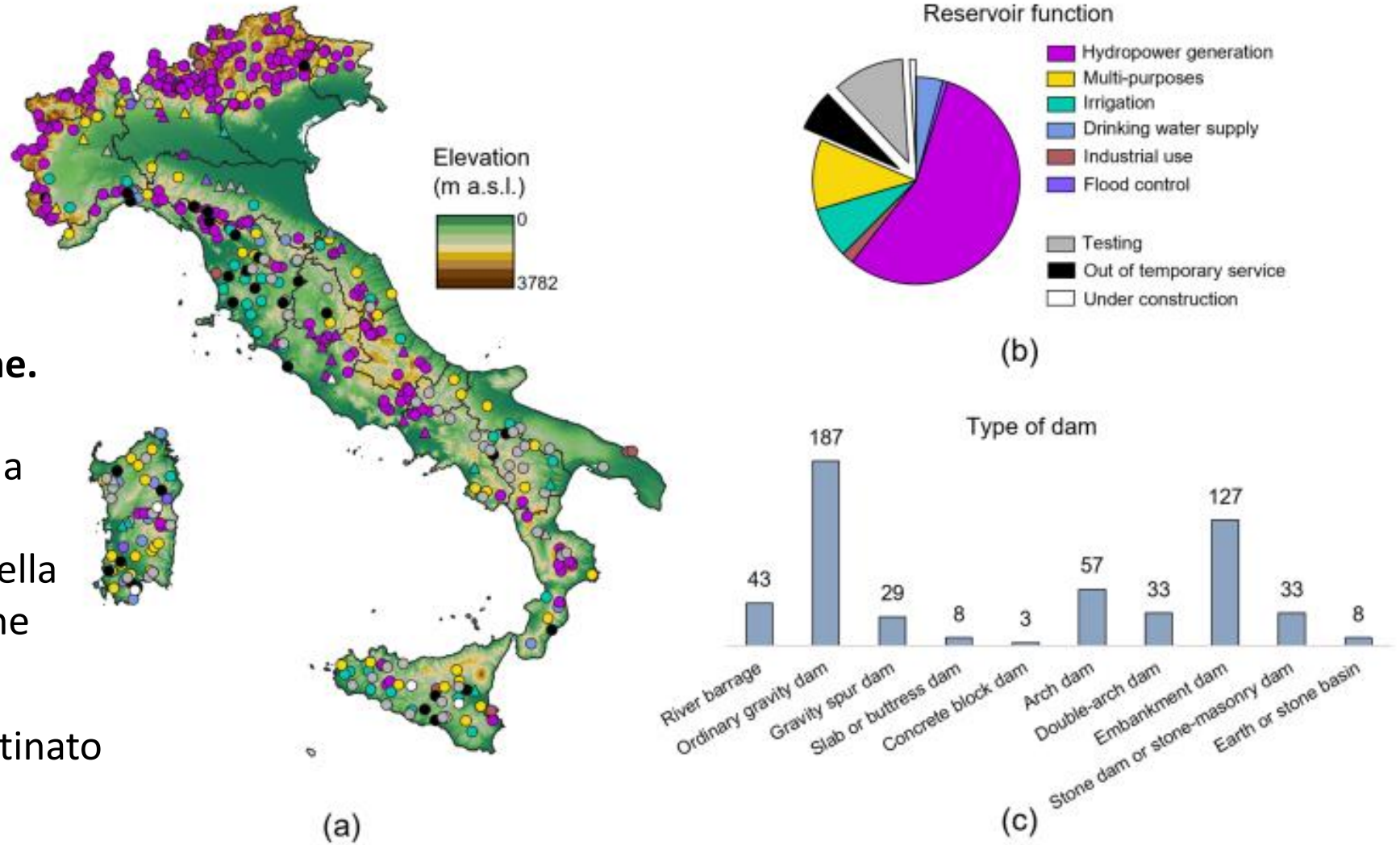


Figure 1. Spatial distribution of the 528 Italian large dams **(a)**, with an overview of their functions **(b)** and construction types **(c)**. The triangles in panel **(a)** correspond to river barrages, while all the other dams are identified by circles.

è stata progettata per il controllo delle piene, l'uso industriale o l'approvvigionamento idrico potabile.

Evangelista et al. (2025)



L'IMPORTANZA DELLE VALUTAZIONI IDROLOGICHE NEI BACINI IN CUI SONO PRESENTI GRANDI DIGHE

In un contesto climatico caratterizzato da crescente variabilità e frequenza di eventi estremi, l'idrologia assume un ruolo strategico nella pianificazione di opere resilienti, sicure ed efficienti, in linea con le più recenti direttive in materia di gestione del rischio idraulico e delle risorse idriche.

L'accurata valutazione del regime pluviometrico, del deflusso superficiale e delle portate fluviali è fondamentale per il corretto dimensionamento degli invasi, la stima del rischio di piena e la salvaguardia dell'integrità strutturale delle opere nel lungo periodo.

L'impiego di modelli idrologici avanzati consente di simulare scenari estremi, come le piene millenarie, supportando la definizione di strategie ottimali per la gestione degli scarichi e la prevenzione di situazioni critiche potenzialmente dannose per le infrastrutture e per le popolazioni a valle.

RIFERIMENTI NORMATIVI

Quando parliamo di dighe non si può prescinere dal quadro normativo che ne regola la progettazione e la gestione.

In Italia il principale riferimento normativo che stabilisce le norme tecniche per garantire la sicurezza strutturale e funzionale delle dighe è rappresentato dal

D.M. 26 giugno 2014

C.1

"Portata di progetto e dispositivi di scarico"

*Gli scarichi di superficie della diga devono essere dimensionati per l'onda con portata al colmo di piena corrispondente al periodo di ritorno di 1000 anni, per le dighe in calcestruzzo, e di **3000 anni per le dighe di materiali sciolti,** tenendo conto dell'effetto di laminazione esercitato dal serbatoio*

RIFERIMENTI NORMATIVI

D.M. 26 giugno 2014

C.1

"Portata di progetto e dispositivi di scarico"

*La portata di piena dovrà essere valutata con **metodi probabilistici basati sull'informazione pluviometrica e idrometrica completa, desumibile dalle serie storiche e dai loro aggiornamenti**, per il bacino idrografico sotteso dalla sezione dello sbarramento. **In assenza o carenza di informazioni, si potrà fare anche riferimento a dati di bacini limitrofi idrologicamente omogenei,** utilizzando appropriate e giustificate metodologie di calcolo*

H.1

«Generalità»

*Per quanto non diversamente specificato nel presente articolo, le disposizioni di carattere generale contenute negli altri articoli delle **presenti norme costituiscono il riferimento anche per le dighe esistenti***

METODI E STRUMENTI PER LA DETERMINAZIONE DELLE PORTATE AL COLMO

La **determinazione delle portate al colmo di piena** costituisce un passaggio cruciale nell'analisi delle dinamiche fluviali e nella gestione del rischio idraulico.

Inizialmente, il calcolo delle portate massime era affidato a **formule empiriche**, che esprimevano la portata di piena come funzione deterministica delle caratteristiche geomorfologiche del bacino idrografico ma con il tempo si è passati a metodi più avanzati che integrano concetti statistici e probabilistici.

Un cambiamento cruciale è stato l'introduzione del **tempo di ritorno** (introdotto per la prima volta da Fuller nel 1914 e successivamente sviluppato e formalizzato da E.J. Gumbel nel 1958), **che ha permesso di associare a ogni portata una probabilità di accadimento**, migliorando la valutazione del rischio rendendo la **progettazione idraulica più rigorosa e coerente con le moderne pratiche ingegneristiche**.

METODI E STRUMENTI PER LA DETERMINAZIONE DELLE PORTATE AL COLMO

È ben noto dalla letteratura la presenza di numerosi approcci metodologici sviluppati a tale scopo, la cui evoluzione ha accompagnato l'integrazione progressiva delle conoscenze **statistiche e probabilistiche** nell'ambito dell'idrologia tradizionale.

Metodi diretti	• Metodo Razionale, Metodo SCS-CN, Modelli afflussi-deflussi (es. Nash, IUH)
Metodi statistici	• Analisi di frequenza su dati locali
Metodi regionali	• **VAPI**
Metodi indiretti	• Curve di riduzione del colmo (empirici o analitici)
Metodi empirici	• Valutazione della Q in funzione della superficie del bacino

I metodi diretti sono semplici rapidi, utili per progettazioni locali e **adatti per piccoli bacini**.

I **metodi statistici e regionali** invece sono più robusti scientificamente, **ideali per analisi di rischio, pianificazione di infrastrutture critiche e valutazione dei tempi di ritorno estremi**, come richiesto dalle normative per le dighe e le grandi opere.

I **metodi indiretti** basati sui dati fisici del bacino e sulle relazioni regionali (curve di riduzione, etc) sono spesso impiegati come metodi alternativi in assenza di dati (es. ISPRA, Linee Guida RID)

METODI E STRUMENTI PER LA DETERMINAZIONE DELLE PORTATE AL COLMO

Metodi per la stima dei parametri delle distribuzioni di probabilità

L'adozione di un approccio probabilistico per la valutazione della piena di progetto rappresenta uno degli ambiti più rilevanti e dibattuti dell'idrologia moderna

Metodo della massima verosimigliaza (Maximum Likelihood, ML)

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^{n} f((x_i)|\boldsymbol{\theta})$$

- ✓ **Restituisce la minore varianza dei parametri stimati rispetto ad altri metodi.**
- ✓ **Estremamente diffuso nell'analisi di frequenza delle piogge e delle piene.**

Metodo dei momenti pesati in probabilità (Probability Weighted Moments, PWM)

$$M_{p,r,s} = E[X^p F^r (1-F)^s] = \int_0^1 [x(F)]^p F^r (1-F)^s dF$$

- ✓ **Di facile applicazione grazie alla possibilità di interpretare i parametri in termini di proprietà geometriche della distribuzione**
- ✓ **Stime meno efficienti**

Metodo degli L moment

$$\lambda_r = \frac{1}{r}\sum_{i=0}^{r-1}(-1)^i \binom{r-1}{i} E\{X_{r-i:r}\}$$

- ✓ **Fornisce stime confrontabili con quelle ottenute con il metodo della massima verosimiglianza**
- ✓ **Procedure di stima più semplici**

In generale non è semplice stabilire quale degli approcci sopraelencati e quale metodo di stima dei parametri fornisca le stime migliori per i periodi di ritorno.
Com'è facilmente intuibile, ciascun approccio e ciascun metodo di stima presenta dei vantaggi e degli svantaggi e l'analisi consiste anche nella valutazione della loro affidabilità.

DETERMINAZIONE DELL'ONDA DI PIENA: METODI E IMPLICAZIONI PROGETTUALI

Metodi per la determinazione degli idrogrammi di piena

La determinazione dell'onda di piena rappresenta un elemento centrale nel processo progettuale, poiché **il volume associato all'idrogramma incide direttamente**

livelli idrici dell'invaso

↳ **QUOTA DI MASSIMO INVASO**

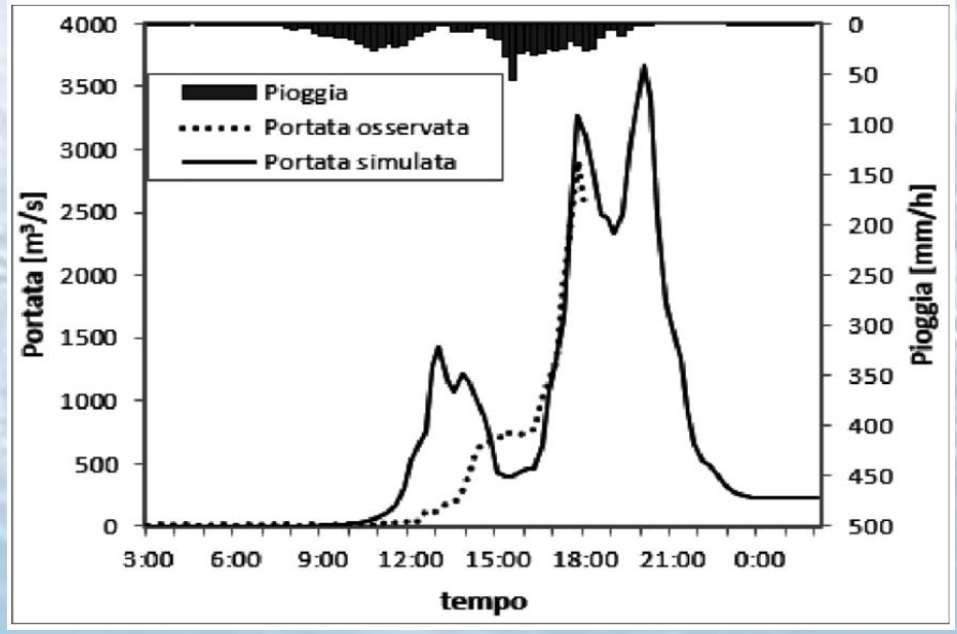
condizioni di sicurezza

↳ **FRANCO IDRAULICO**

esercizio dell'opera

↳ **MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO DEGLI ORGANI DI SCARICO**

Nella realtà è molto raro avere a disposizione serie storiche di idrogrammi osservati: solitamente, infatti, i dati sulle onde di piena, se esistono, sono pochi e non molto affidabili a causa della inattendibilità delle scale di deflusso in corrispondenza dei valori più elevati di portata.



Valutazione dei volumi di piena a frequenza assegnata

Il problema della caratterizzazione probabilistica dei volumi può essere affrontato ricorrendo a **schematizzazioni semplificate della forma degli idrogrammi, purchè in grado di conservare le caratteristiche di occorrenza del volume**. Essendo ininfluente la forma dell'idrogramma, la previsione dei volumi di piena può essere ricondotta, in analogia al caso delle precipitazione intense, alla valutazione dei quantili VD,R, ovvero dei volumi defluenti in assegnata durata D e con prefissato tempo di ritorno R.

Se si fa riferimento ai valori medi del deflusso, si può scrivere:

$$Q_{D,R} = \frac{V_{D,R}}{D}$$

in questa ottica, il Nerc (1975) ha proposto di valutare i quantili QD,R ricorrendo alle cosiddette leggi di riduzione dei colmi di piena:

$$\varepsilon_{D,R} = \frac{Q_{D,R}}{Q_R}$$

in cui QR rappresenta la portata al colmo avente il medesimo tempo di ritorno R di QD,R. In base a tale impostazione, la stima dei quantili dei volumi defluenti in assegnata durata, VD,R, può essere operata una volta che sia stata identificata e tarata la funzione εD,R e valutata la distribuzione di probabilità delle portate al colmo.

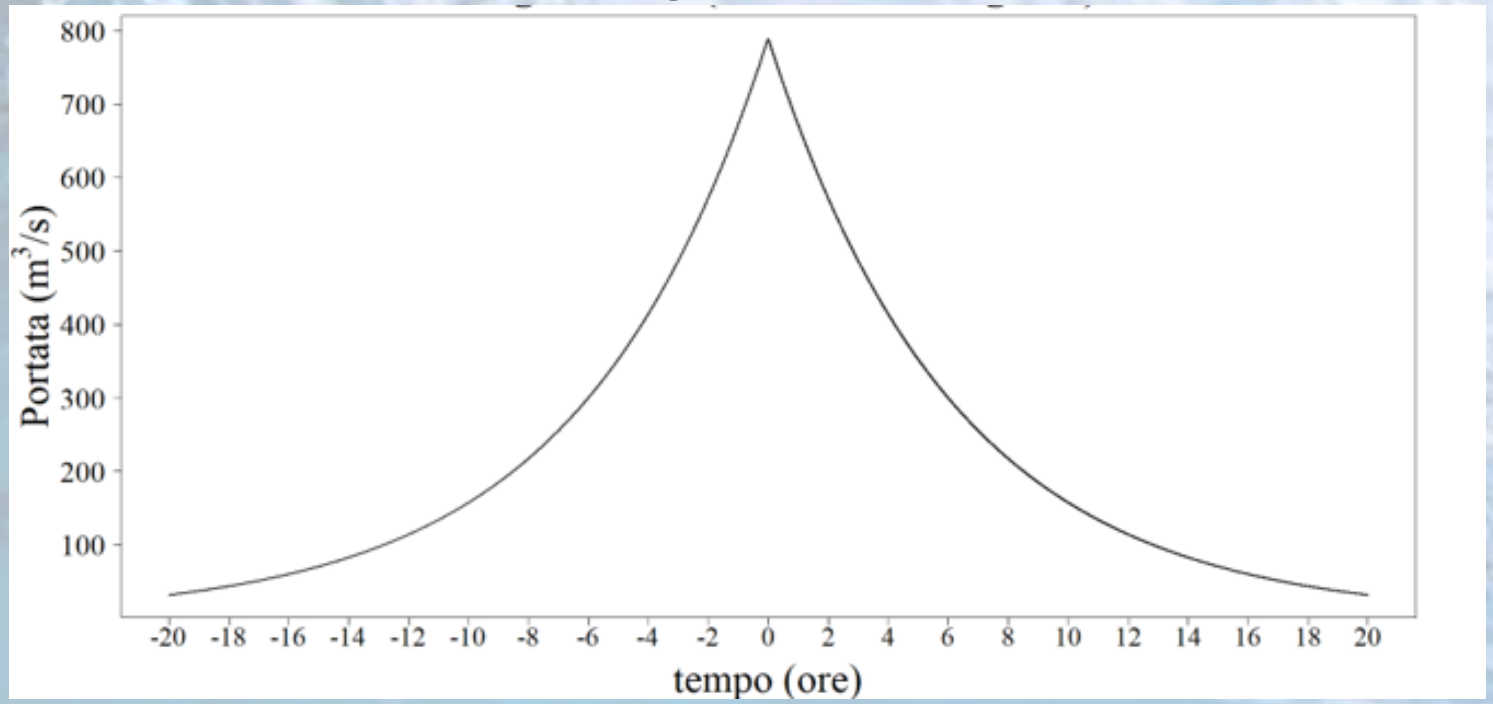
Valutazione dei volumi di piena a frequenza assegnata
Idrogramma Fiorentino – Margiotta (1998)

$$q(t) = Q_T \exp\left(-\frac{2|t|}{k}\right)$$

essendo Q_T la portata massima nella sezione corrispondente ad un tempo di ritorno T e *k* un parametro definibile attraverso la seguente relazione

$$k = 1{,}027\, \tau_r \exp(2{,}277\, n)$$

essendo τ_r il tempo di ritardo del bacino considerato ed n l'esponente della curva di possibilità pluviometrica. L'idrogramma sintetico che ne deriva ha la seguente forma:



Valutazione dei volumi di afflusso massimi

La valutazione dei **volumi di afflusso massimi** può essere effettuata anche attraverso l'implementazione di un

Modello afflussi - deflussi

in grado di rappresentare la risposta idrologica del bacino sotteso all'invaso in relazione ad eventi di precipitazione caratterizzati da un tempo di ritorno caratteristico della progettazione dello sfioratore di superficie

che sia relativo sia alla portata al colmo che al volume sotteso all'onda di piena

e che a tal fine possa considerare eventi di precipitazione di diversa durata allo scopo di verificare il rispetto delle prescrizioni di regolamento in materia di rispetto del franco in qualsiasi condizione idrologica avversa.

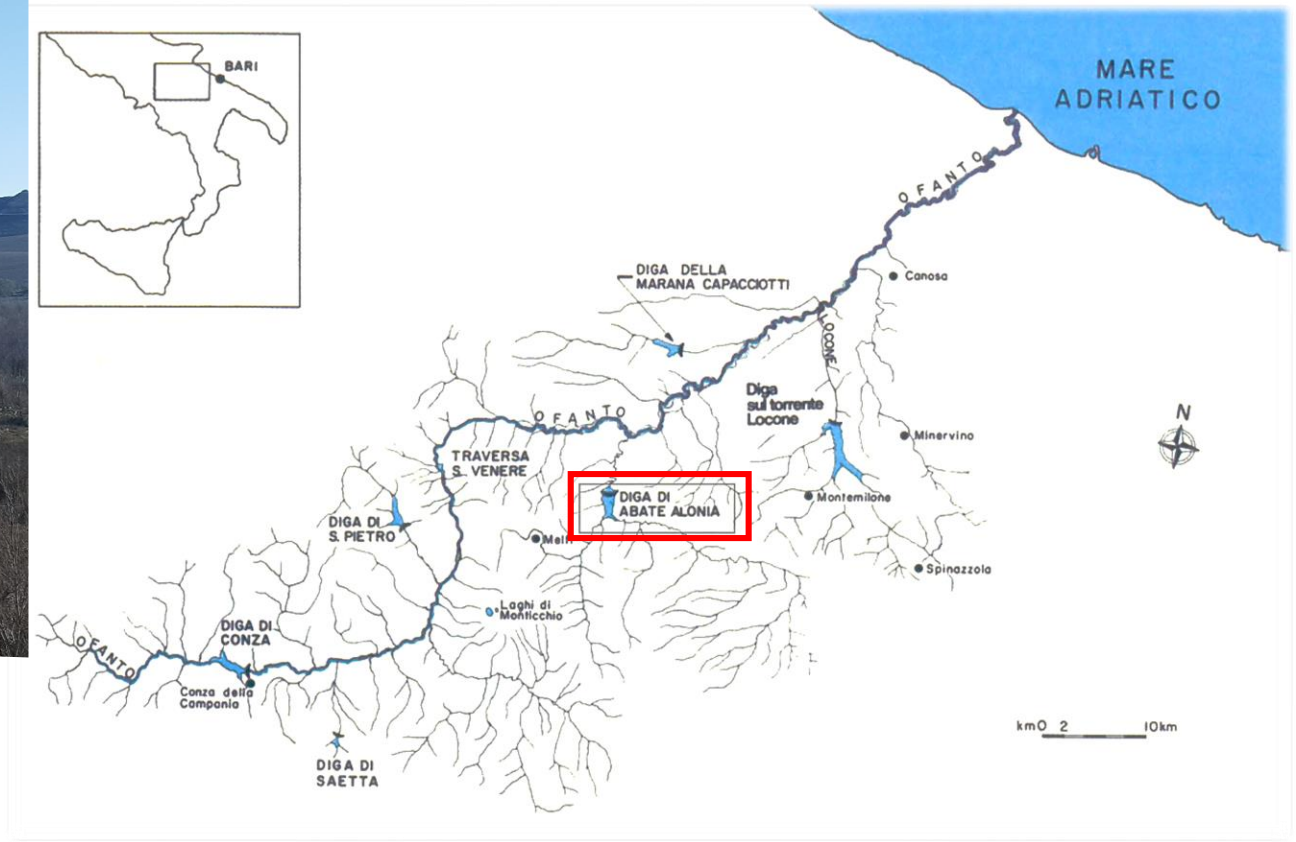
Modello per CPP

modello di infiltrazione

modello concentrazione onda di piena

→ **Idrogramma di piena**

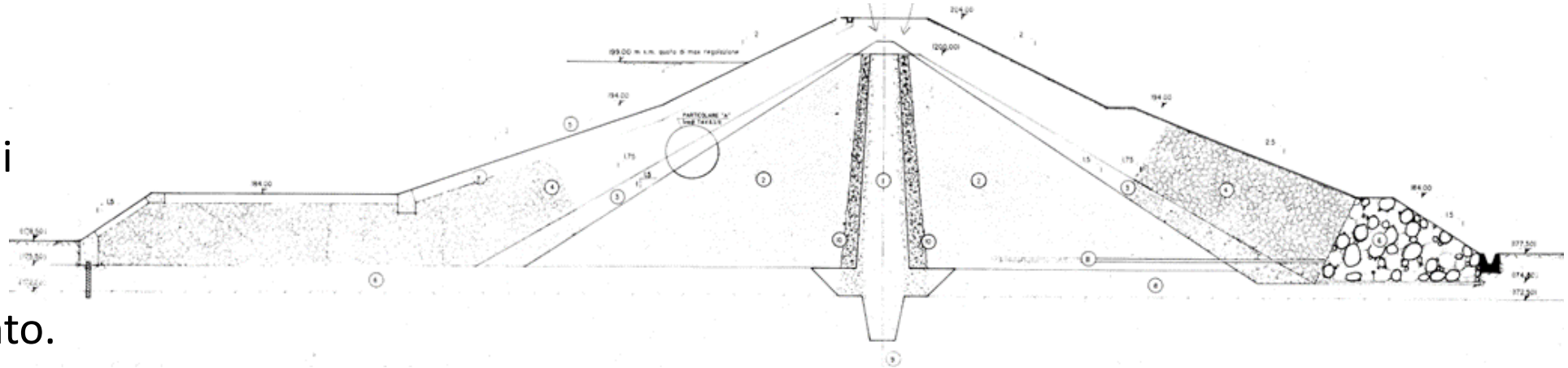




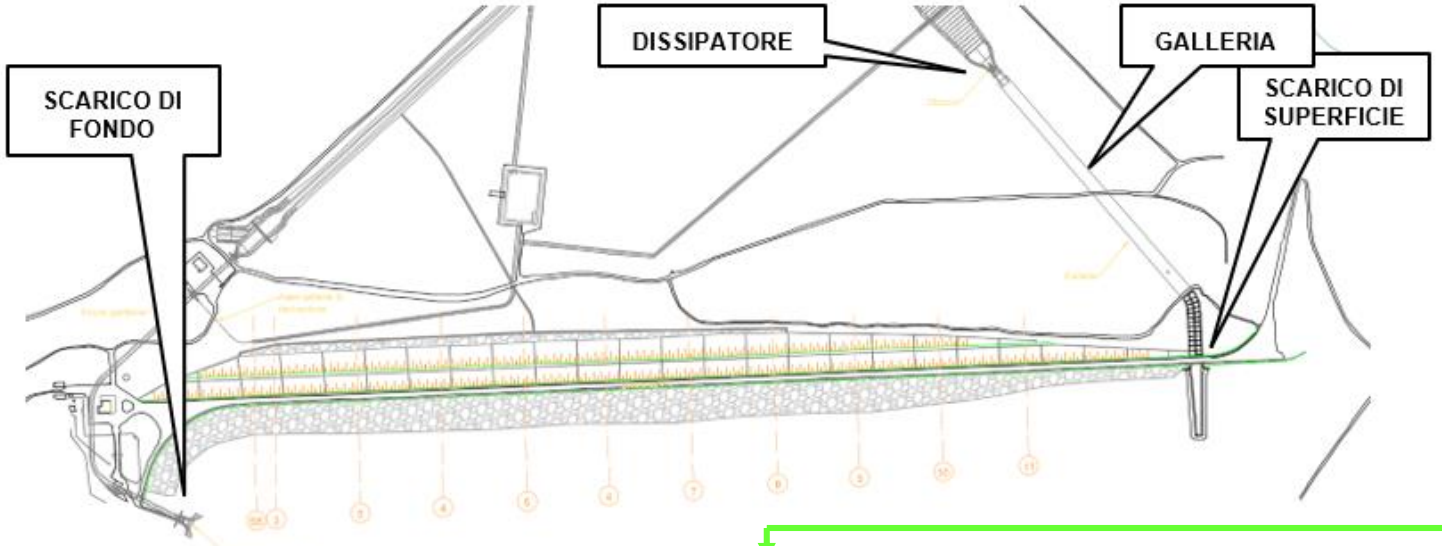
CASO DI STUDIO: l'invaso di Abate Alonia

in agro di Lavello (PZ).

Diga in terra di tipo zonato realizzata negli anni '50 sul torrente Olivento, affluente di destra del fiume Ofanto.



CASO DI STUDIO: l'invaso di Abate Alonia







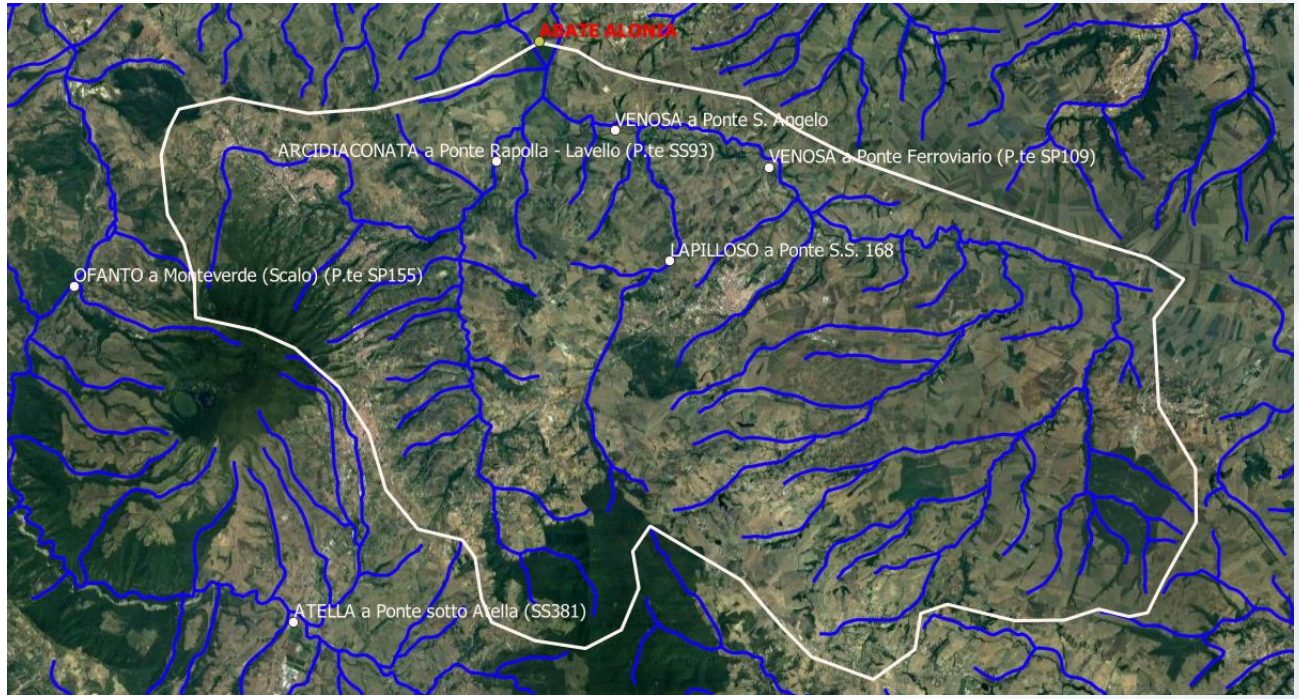


soglia sfiorante a quota 199,00 m s.l.m. della lunghezza di 178,20 m disposta in fregio ad un canale collettore della di larghezza variabile

Ortofoto AGEA 2023

CASO DI STUDIO: l'invaso di Abate Alonia

L'intero bacino idrografico superficiale sotteso dall'invaso ha un'area di circa 408 km^2

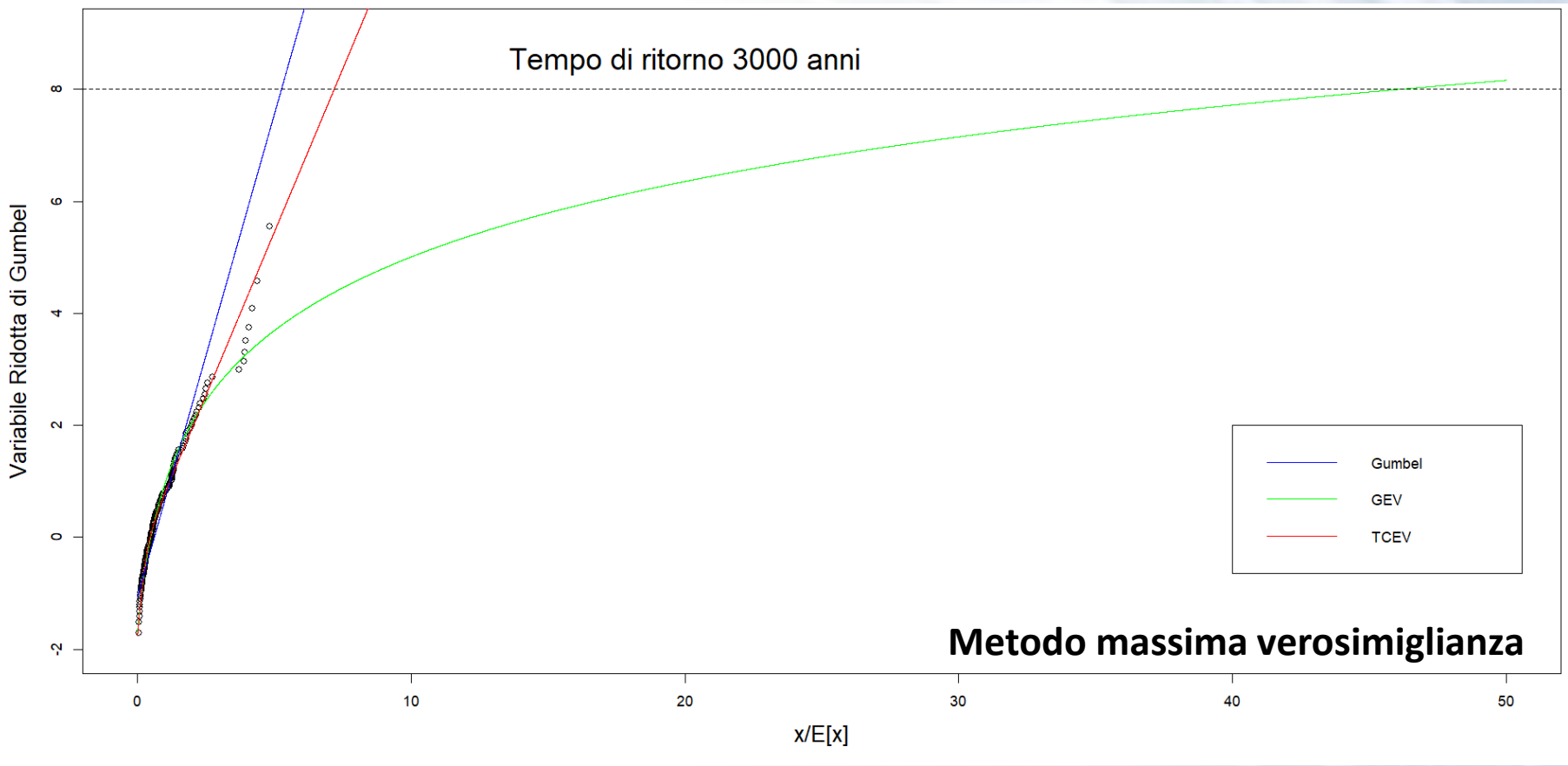


Caratteristiche invaso da FCEM

		Configurazione originale	Configurazione attuale
Quota di coronamento	m s.l.m.	202,00	204,00
Quota testa muro paraonde	m s.l.m.	--	205,00
Larghezza coronamento	m	6,50	10,00
Sviluppo coronamento	m	1218,00	1218,00
Altezza massima rilevato	m	27,80	29,80
Quota minima piano imposta rilevato	m s.l.m.	174,20	174,20
Quota massima di regolazione	m s.l.m.	199,00	196,00* *Attualmente lo sfioratore è tagliato
Quota di max invaso	m s.l.m.	200,00	200,00
Franco	m	2,00	4,00
Volume totale serbatoio	m^3	22,80 x 10^6	22,80 x 10^6
Area del bacino imbrifero	Km^2	408,00	408,00

CASO DI STUDIO: analisi di serie storiche mediante applicazione di diverse distribuzioni di probabilità

Curve di frequenza in carta probabilistica di Gumbel.



GEV si dimostra inadeguata a rappresentare i valori più estremi del campione

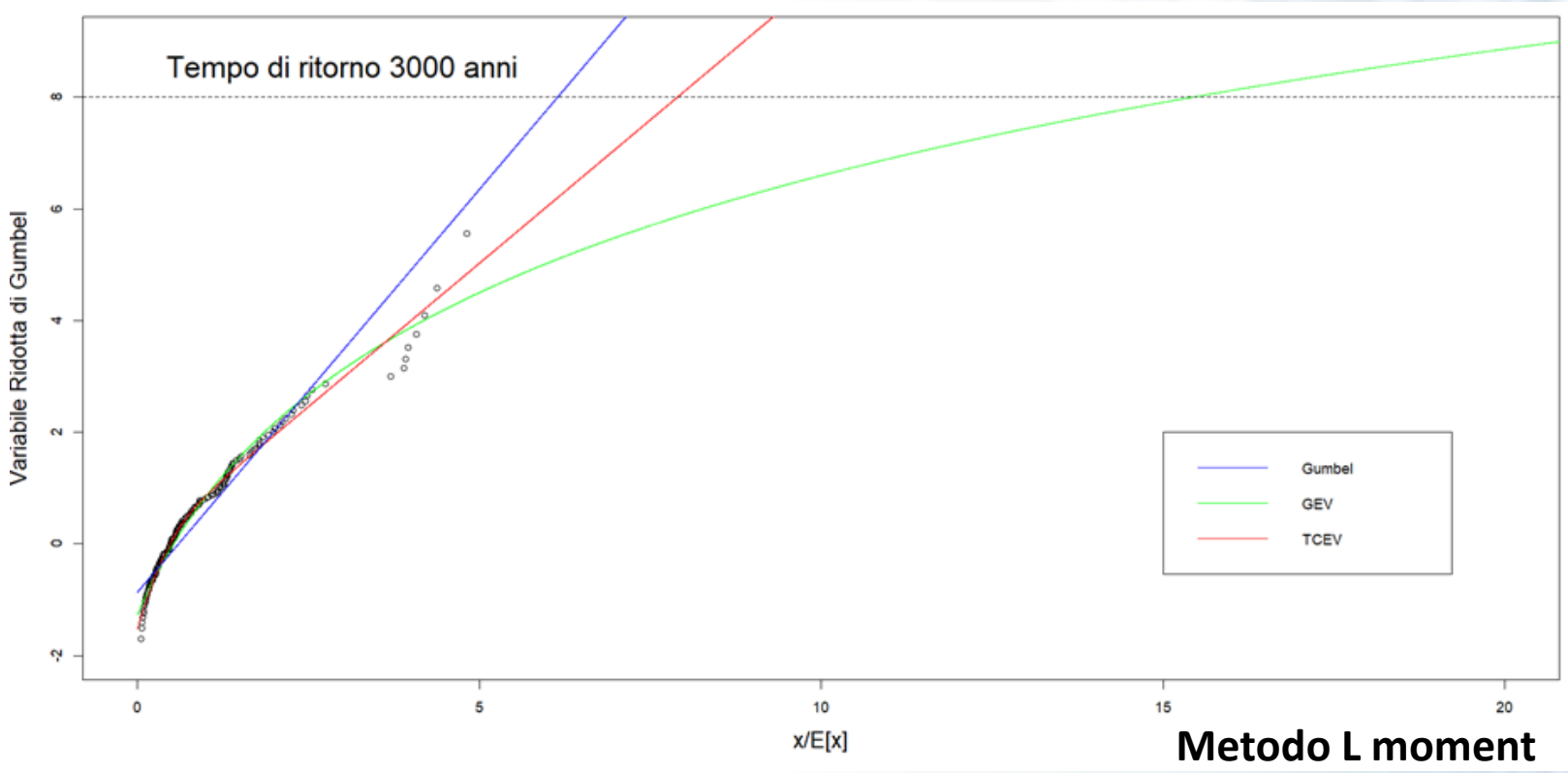
Gumbel si dimostra inadeguata in maniera più evidente nella mancata interpretazione della curvatura presente nei dati

Distribuzione	AIC
GEV	313.78
TCEV	309.020
Gumbel	354.02

TCEV abile nell'interpretare i valori più estremi del campione

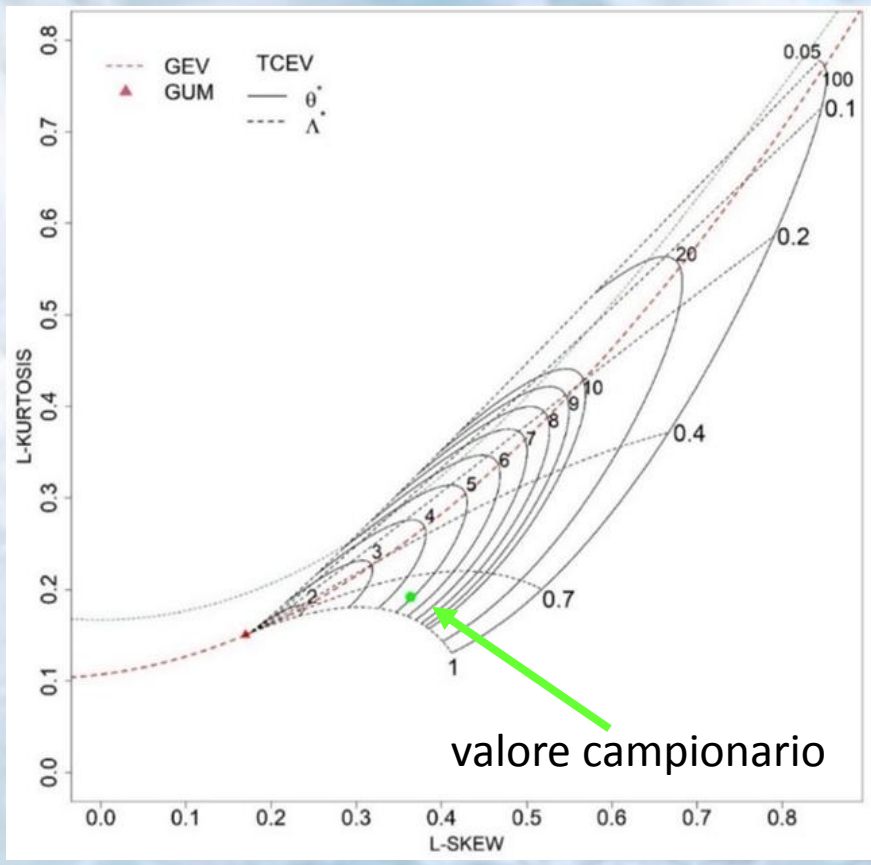
CASO DI STUDIO: analisi di serie storiche mediante applicazione di diverse distribuzioni di probabilità

Curve di frequenza in carta probabilistica di Gumbel.



Metodo L moment

TCEV dimostra offrire una maggiore flessibilità nella coda destra.



L-Moment Ratio Diagram

La bontà dell'adattamento fornito dalla TCEV è legato al fatto che le distribuzioni a quattro parametri sono in grado di coprire un'area nel diagramma, e non una semplice linea.

CASO DI STUDIO: Excursus delle valutazioni disponibili delle portate al colmo

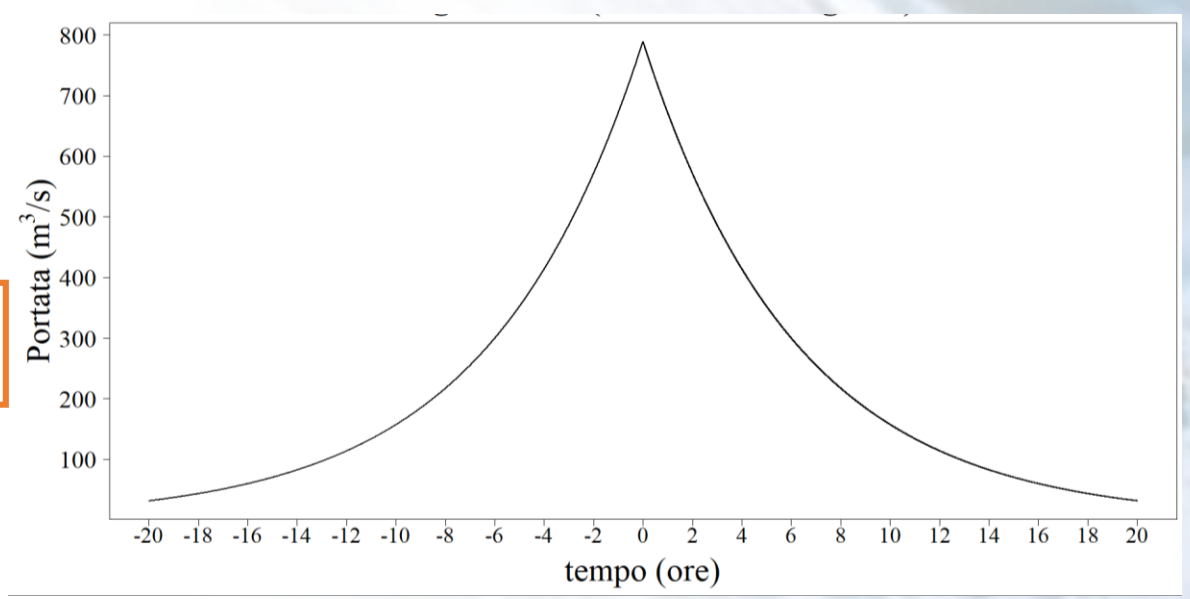
Fonte	Anno	Tempo di Ritorno (anni)	Portata al colmo (m^3/s)
Progetto originale dell'invaso	1949	-	162,0
Ing. Sensidoni	1955	-	510,0
Gherardelli-Marchetti	1965	-	868,0
Giandotti	1965	-	768,0
Fuller	1965	500	748,0
Sezione Autonoma di Bari del Servizio Idrografico del Ministero dei Lavori Pubblici	1965	500	795,0
Elaborazioni dal Piano di Bacino del fiume Ofanto	1987	10000	320,0
Relazione del progetto per il risanamento della diga	1996	500	765,0
Rivisitazione del precedente con dati aggiornati	1997	1000	792,0
PAI-VAPI	2004	1000	422,0
Alluvioni (PGRA 2021)	2021	30	241,2
Alluvioni (PGRA 2021)	2021	200	381,8
Alluvioni (PGRA 2021)	2021	500	451,0

La tabella proposta ha lo scopo di riassumere in forma organica le valutazioni deducibili dalla bibliografia consultata e si presta ad una serie di considerazioni di assoluto interesse

- *complesso effettuare un confronto razionale tra i risultati ottenuti*
- *diversa base dati utilizzata, che ha visto via via aumentare la numerosità campionaria per fermarsi sino alla formalizzazione della procedura VAPI, tuttora riferimento valido all'interno del territorio italiano.*
- *le formule empiriche forniscono valori delle portate al colmo decisamente superiori a quelle derivanti da metodologie probabilistiche consolidate.*

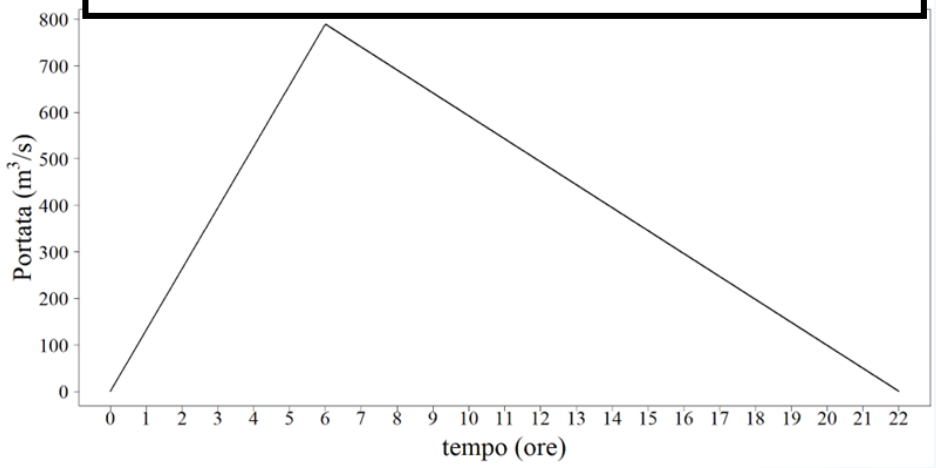
CASO DI STUDIO: determinazione dell'onda di piena

Idrogramma Fiorentino e Margiotta (1998)

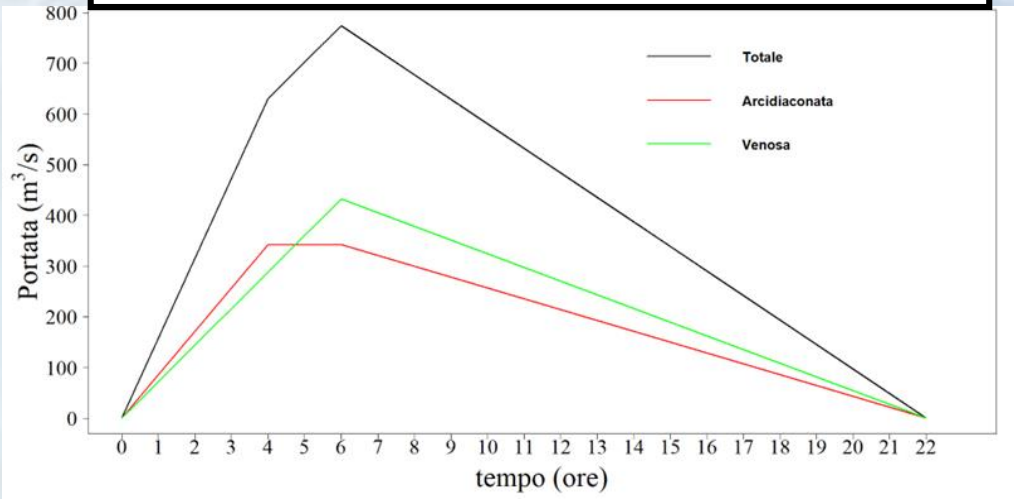


$$q(t) = Q_T \exp\left(-\frac{2|t|}{k}\right)$$

Idrogramma triangolare classico



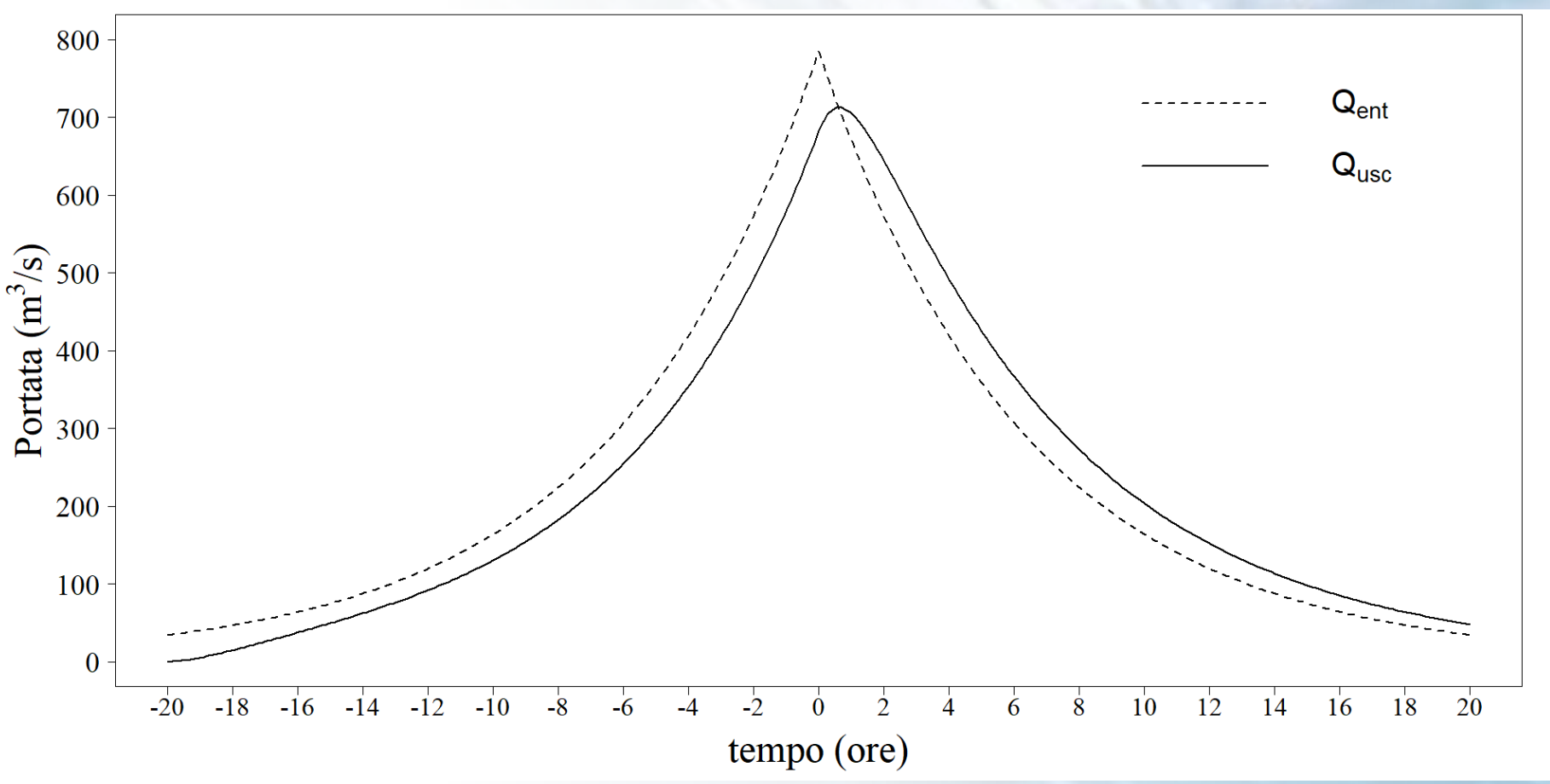
Idrogramma derivante dalla sovrapposizione dei corsi d'acqua confluenti



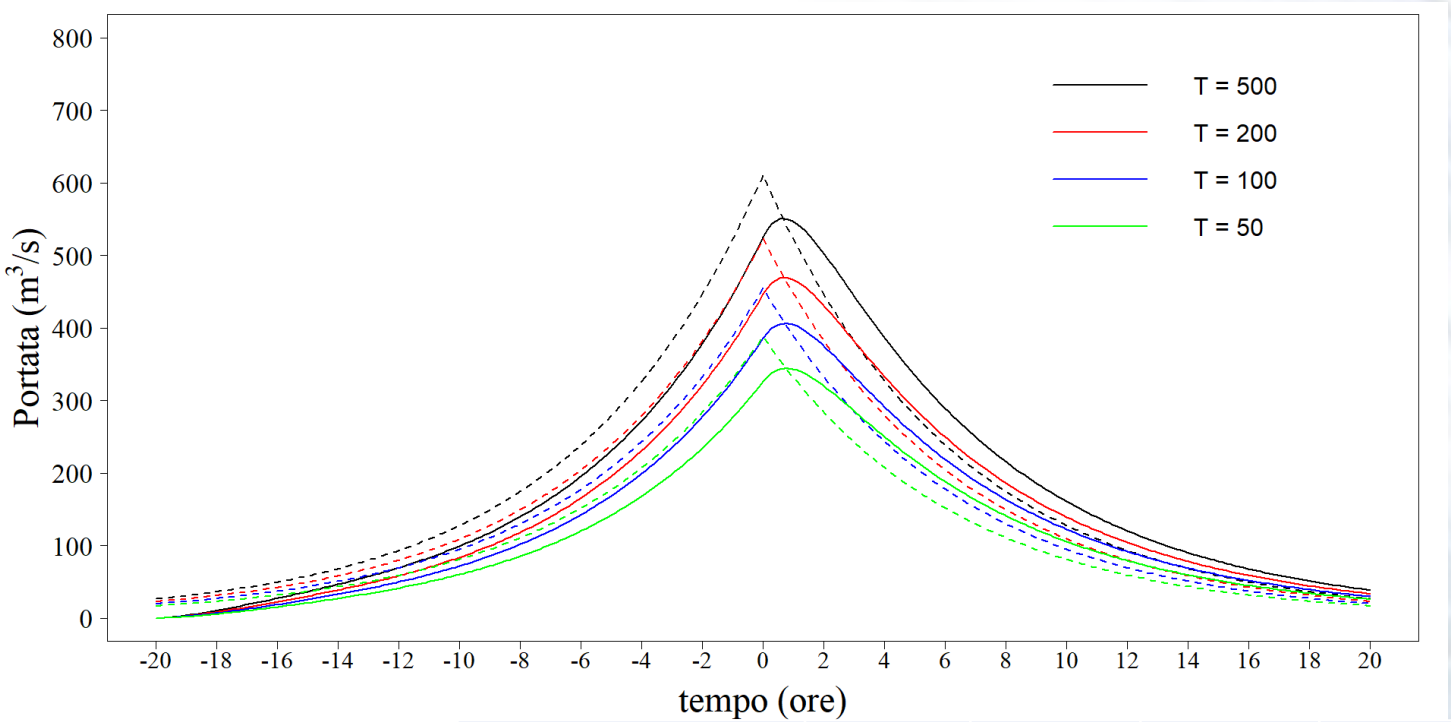
CASO DI STUDIO: esercizio di calcolo delle grandezze caratteristiche del fenomeno di laminazione

Ipotesi alla base dell'esercizio di calcolo: condizione di deflusso libero

Tempo di ritorno preso a riferimento 3000 anni



CASO DI STUDIO: esercizio di calcolo delle grandezze caratteristiche del fenomeno di laminazione per altri tempi di ritorno richiesti dalla normativa vigente

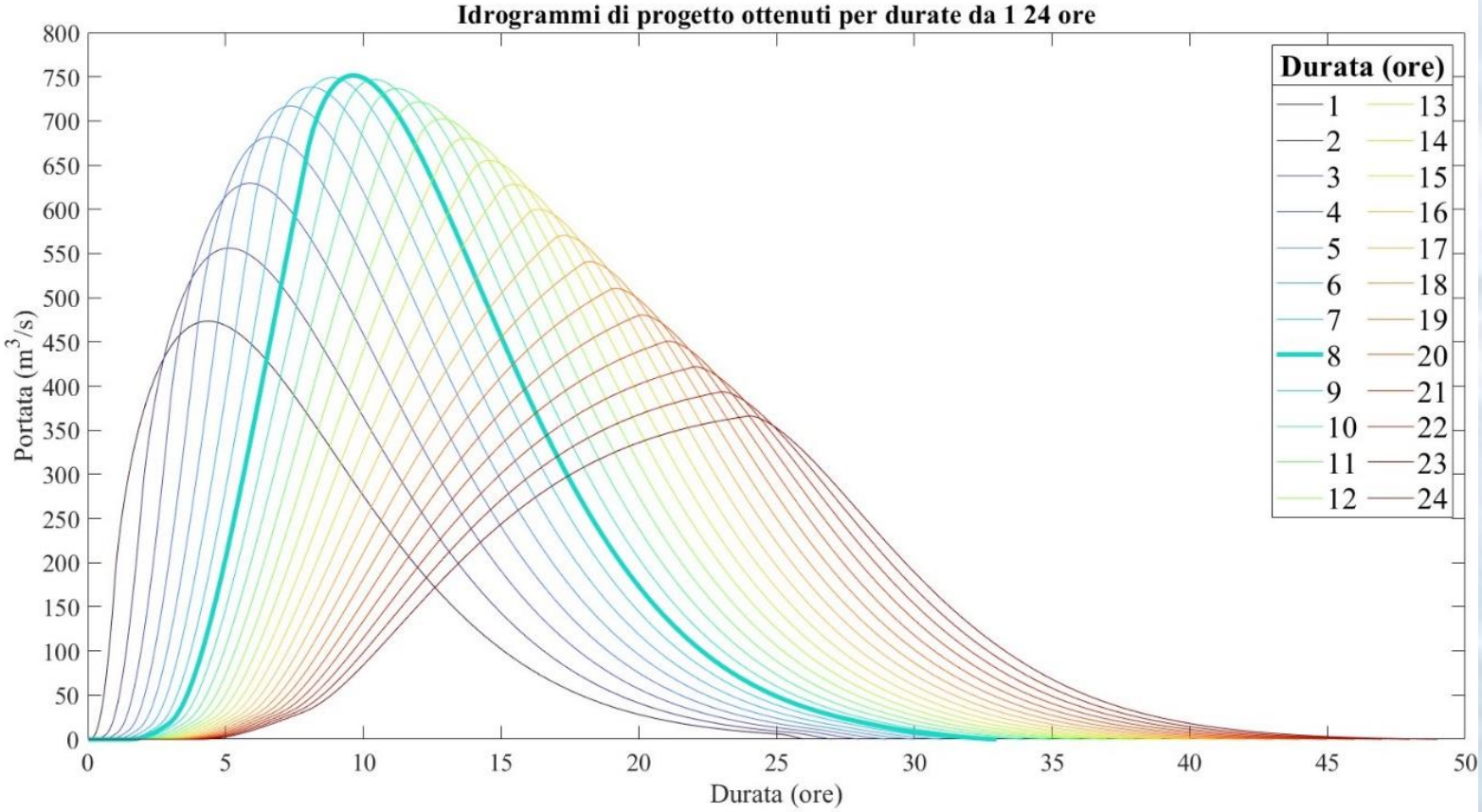


Ipotesi alla base dell'esercizio di calcolo: condizione di deflusso libero

Tempo di ritorno	$Q_{max\ ent}$	$Q_{max\ usc}$	h_{max}	H_{max}	V_{lam}	Franco	Franco netto minimo
(anni)	m^3/s	m^3/s	m	m s.l.m.	Mm^3	m	m
3000	785	712,55	1,524	200,524	3,359	3,5	1,90
500	611	550,82	1,283	200,283	2,808	3,7	1,90
200	523	469,26	1,153	200,153	2,514	3,8	1,90
100	455	406,34	1,048	200,048	2,276	3,9	1,90
50	388	344,54	0,939	199,939	2,032	4,1	1,90

CASO DI STUDIO: determinazione dei massimi volumi di afflusso

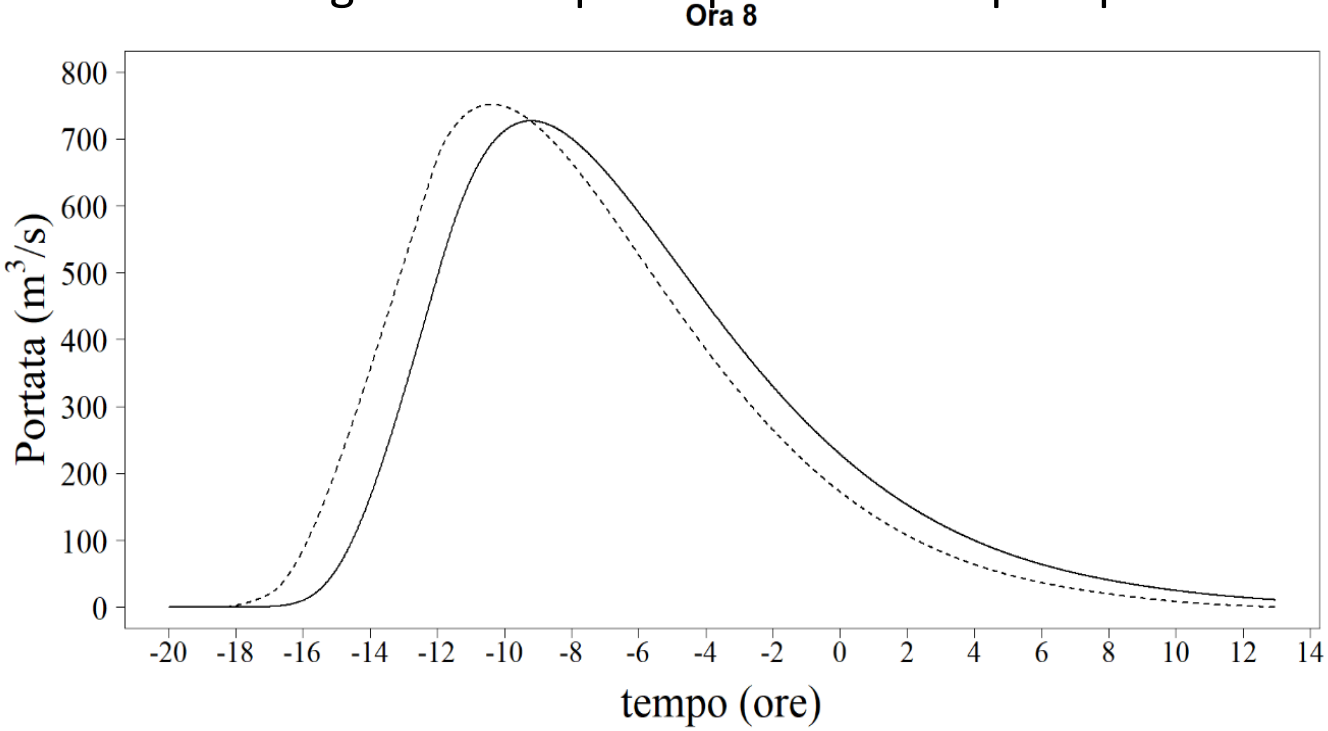
Modello afflussi-deflussi in grado di rappresentare la risposta idrologica del bacino sotteso all'invaso in relazione ad eventi di precipitazione caratterizzati da un tempo di ritorno caratteristico della progettazione dello sfioratore di superficie **che sia relativo sia alla portata al colmo che del volume sotteso all'onda di piena** e che a tal fine possa considerare eventi di precipitazione di diversa durata **al fine di verificare il rispetto delle prescrizioni di regolamento in materia di rispetto del franco in qualsiasi condizione idrologica avversa.**



Il **modello considera inoltre le dinamiche del processo di laminazione** per effetto della razionalizzazione del **comportamento dello scarico di superficie ai fini della determinazione delle altezze di massima laminazione, della portata uscente e del volume di laminazione**.

CASO DI STUDIO: determinazione dei massimi volumi di afflusso

- curva di possibilità climatica per Tr di 3000 anni tramite procedura regionale VaPi Puglia
- modello di infiltrazione della legge di Horton
- modello di Idrogramma Istantaneo Unitario (IUH) di tipo Geomorfologico di Weibull (determinazione dell'idrogramma di piena per eventi di precipitazione di diversa durata).



Per ognuno di questi idrogrammi, considerato come in ingresso all'invaso, partendo da una **condizione iniziale di livello idrico alla quota di massima regolazione**, si è calcolato il processo di routing all'interno dello sfioratore di superficie nella sua condizione di progetto e si sono calcolati i valori corrispondenti dalla **massima portata uscente**, della **massima altezza di laminazione** e del **massimo volume di laminazione**.

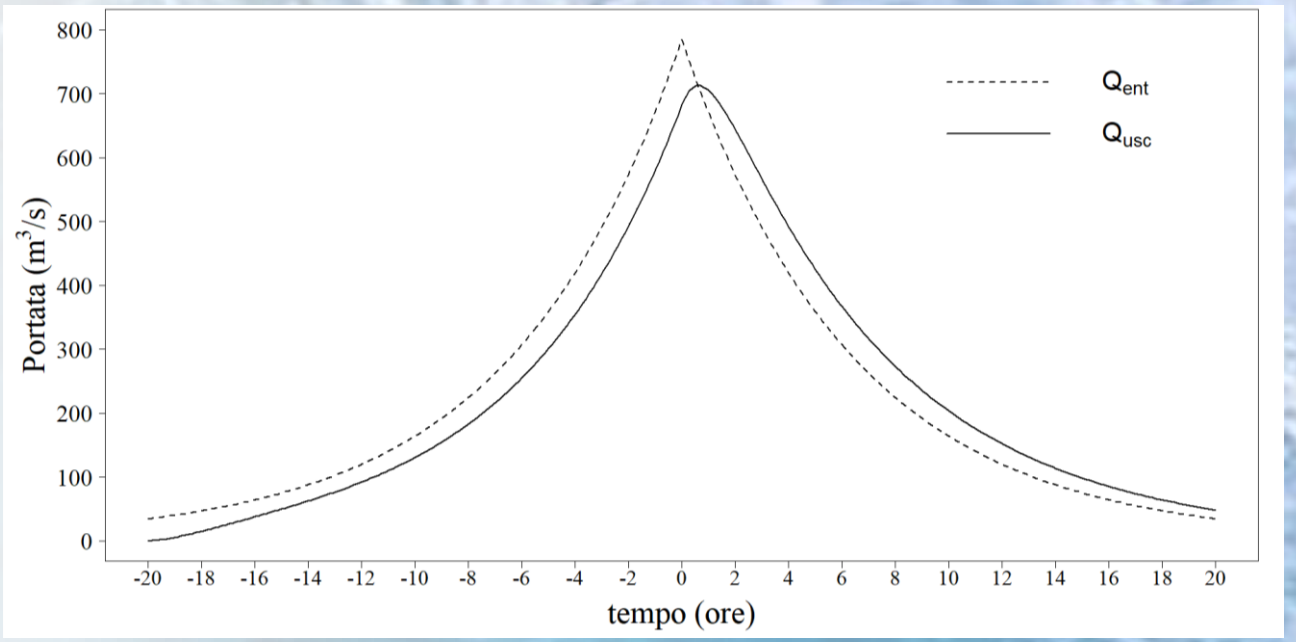
la condizione massimizzante tra tutte quelle analizzate può considerarsi tecnicamente equivalente rispetto a quanto ottenuto con il metodo dell'igrogramma sintetico Fiorentino-Margiotta.

CONCLUSIONI CASO DI STUDIO

Le valutazioni condotte sul caso di studio sono state basate su un **approccio di tipo cautelativo** formulando ipotesi gravose in merito

- alle caratteristiche di permeabilità del suolo
- **alla condizione iniziale di livello idrico nell'invaso posta pari alla quota di massima regolazione**

Il risultato interessante è stato ottenuto dal confronto dei diversi metodi adottati per calcolo delle condizioni massimizzanti che ha portato ad individuare nell'idrogramma Fiorentino – Margiotta il dato più cautelativo



CONCLUSIONI

Un numero significativo di grandi dighe in Italia risale alla metà del XX secolo.

Il tasso di crescita più elevato si è verificato tra il 1950 e il 1970. Conoscere la distribuzione temporale delle dighe e, in particolare, l'anno di fine costruzione è fondamentale per condurre analisi accurate della frequenza delle piene (ad esempio Villarini et al., 2011; López e Francés, 2013) e per calibrare e aggiornare i modelli idrologici (ad esempio Chaudhari e Pokhrel, 2022).

Evangelista et al. (2025)

L'Italia di trova di fronte ad una **sfida strategica**: **modernizzare le proprie dighe ed adeguarle alle nuove normative vigenti** per garantire la **sicurezza idraulica**, **affrontare i cambiamenti climatici** e **valorizzare il potenziale energetico** costruendo **sistemi più resilienti e sostenibili**.

CONCLUSIONI

Per affrontare le sfide del futuro in maniera funzionale diventerà progressivamente cruciale:

Possedere una conoscenza accurata delle nostre infrastrutture attuali.

Avere un'ampia disponibilità di dati idrologici (pluviometrici, idrometrici, etc) a supporto delle analisi statiche

Migliorare ed estendere le attuali reti di monitoraggio

Adeguare gli strumenti teorici e progettuali ai cambiamenti climatici


GRAZIE PER
L'ATTENZIONE