

# PRINCIPI DI IDROLOGIA

Concetti di base e principali metodi per la determinazione della portata di progetto

Franco Raimondi

25 MAGGIO 2021

**ERSAF**  
ENTE REGIONALE PER I SERVIZI  
ALL'AGRICOLTURA E ALLE FORESTE

  
Regione Lombardia

  
CONTRATTI di FIUME



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

## Bilancio idrologico

- definizioni di base: bacino, spartiacque, sezione di chiusura
- formula e grandezze

1

### Precipitazioni

- Strumenti di misura
- Tipologie di pioggia
- Regimi pluviometrici

### Curve possibilità pluviometrica

#### Metodi di stima areale

- Isoiete
- Media aritmetica
- Griglia
- Poligoni/topoietti
- Geostatistico (kriging)
- Fattore di riduzione areale

#### letogrammi

- Costante
- Triangolare
- Chicago

2

### Perdite idrologiche:

- Modello di Horton
- Modello Green-Ampt
- Modello SCS-CN
- Modelli semplici
  
- Evapotraspirazione

3

### Modellazione afflussi-deflussi:

- tipologie di modelli
- IUH
- modelli più utilizzati:
  - Modello corrivazione
  - Modello dell'invaso lineare
  - Modello di Nash
  - Modello di Clark
- Metodo sole piogge

# BILANCIO IDROLOGICO

**BACINO IDROGRAFICO:** porzione di territorio che raccoglie le acque superficiali che defluiscono lungo i versanti e le fa confluire in uno stesso corso d'acqua fino alla sezione di chiusura. È l'unità fisiografica fondamentale alla quale far riferimento nello studio dei fenomeni fluviali e dei processi geomorfologici ad essi legati.

**SPARTIACQUE** (superficiale): linea di cresta dei rilievi che contornano il bacino fluviale e separa un bacino dall'altro.

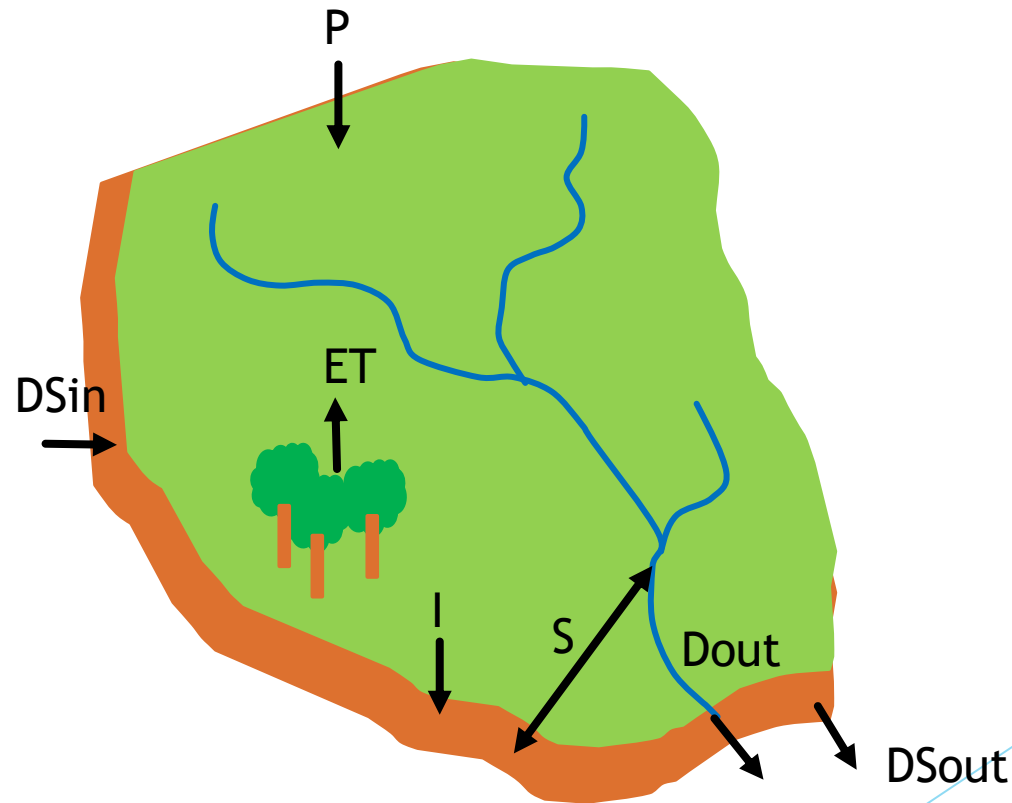
**SEZIONE DI CHIUSURA:** sezione trasversale di un corso d'acqua posto nell'estremità di valle di un bacino idrografico da cui transita tutta l'acqua caduta sul bacino stesso.

Bilancio superficiale:  $P - D_{out} - ET - I \pm S = 0$

Bilancio sotterraneo:  $I + D_{sin} - D_{sout} \pm S = 0$

Bilancio totale:  $P + D_{sin} - D_{out} - D_{sout} - ET = 0$

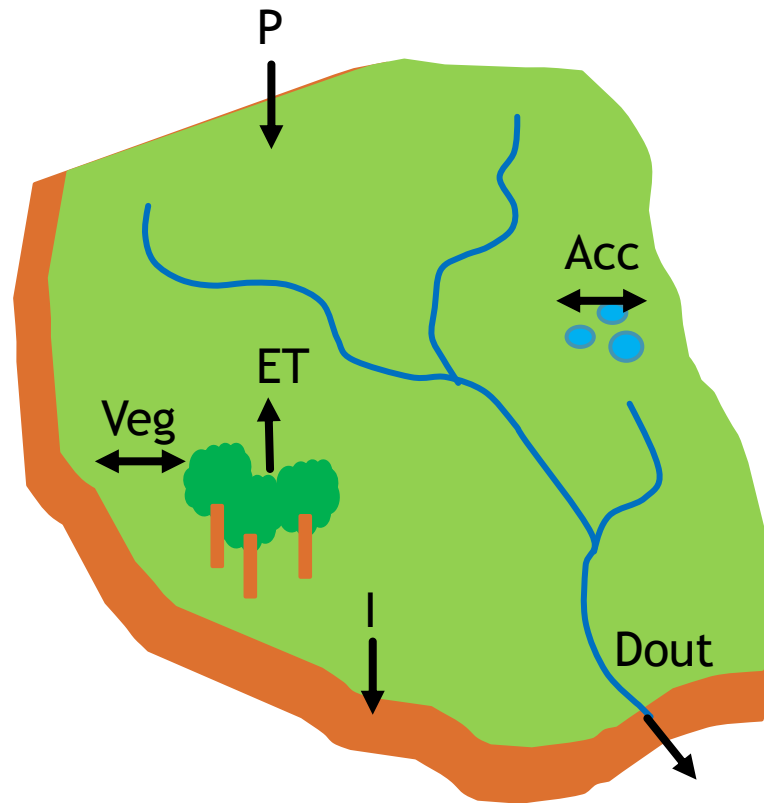
- P: precipitazione
- D<sub>out</sub>: deflusso superficiale in uscita
- ET: evapotraspirazione
- I: infiltrazione nel suolo
- S: interscambio fiume-falda
- D<sub>Sin</sub>: deflusso sotterraneo in ingresso
- D<sub>Sout</sub>: deflusso sotterraneo in uscita



$$P + D_{Sin} - \text{Dout} - D_{sout} - ET - I - \text{Veg} - \text{Acc} = 0$$

$$Q = P - \underbrace{ET - I - \text{Veg} - \text{Acc}}_{\text{Perdite idrologiche}}$$

- Veg: intercettazione vegetale
- Acc: accumulo in depressioni superficiali



1

## PIOGGIA LORDA



Dati precipitazioni  
Curve di possibilità pluviometrica  
Metodi di stima areale  
Ietogrammi

Altezza di precipitazione [mm]

Intensità di precipitazione [mm/h]

2

## PIOGGIA NETTA



Perdite idrologiche

Intensità netta di precipitazione [mm/h]

3

## PORTATA

Modelli afflussi-deflussi

Portata [l/s]

# PRECIPITAZIONI

**STRUMENTI DI MISURA:** la precipitazione si misura in millimetri [mm], un'altezza di pioggia di 1 mm distribuita su una superficie di 1 m<sup>2</sup> corrisponde ad un volume di 1 litro

## Pluviometro

misura la quantità di pioggia caduta in un determinato periodo di tempo. In genere i pluviometri sono costituiti da un recipiente cilindrico sovrastato da un imbuto con la funzione di limitare il più possibile le perdite per evaporazione. Si dividono in:

- Semplici: necessitano di letture quotidiane, l'altezza di precipitazione si calcola dividendo il volume d'acqua raccolto per l'area di cattura dello strumento
- Totalizzatori: vengono utilizzati in luoghi di difficile accesso, come le zone di montagna, e controllati con scadenze molto lunghe (anche di mesi). Sono provvisti di appositi liquidi per evitare congelamento ed evaporazione

## Pluviografo

è un pluviometro registratore poiché la misurazione avviene in modo continuo per mezzo di un pennino scrivente su carta diagrammata che si muove per effetto di una vaschetta basculante o di un galleggiante. Dalla somma di tutti i "gradini" presenti sulla carta diagrammata si ottiene il totale di pioggia caduta. È possibile inoltre misurare l'intensità grazie ad un orologio.

Pluviometro semplice



Pluviometro totalizzatore



Pluviografo a bascula





# TIPOLOGIE DI PIOGGE

## Cicloniche

derivano dall'incontro di due masse d'aria di differenti caratteristiche fisiche, generalmente una calda e una fredda, con la prima che raffreddandosi condensa e genera quindi la precipitazione. Generano i cosiddetti "fronti" e precipitazioni in genere di minore intensità rispetto a quelle convettive

## Convettive

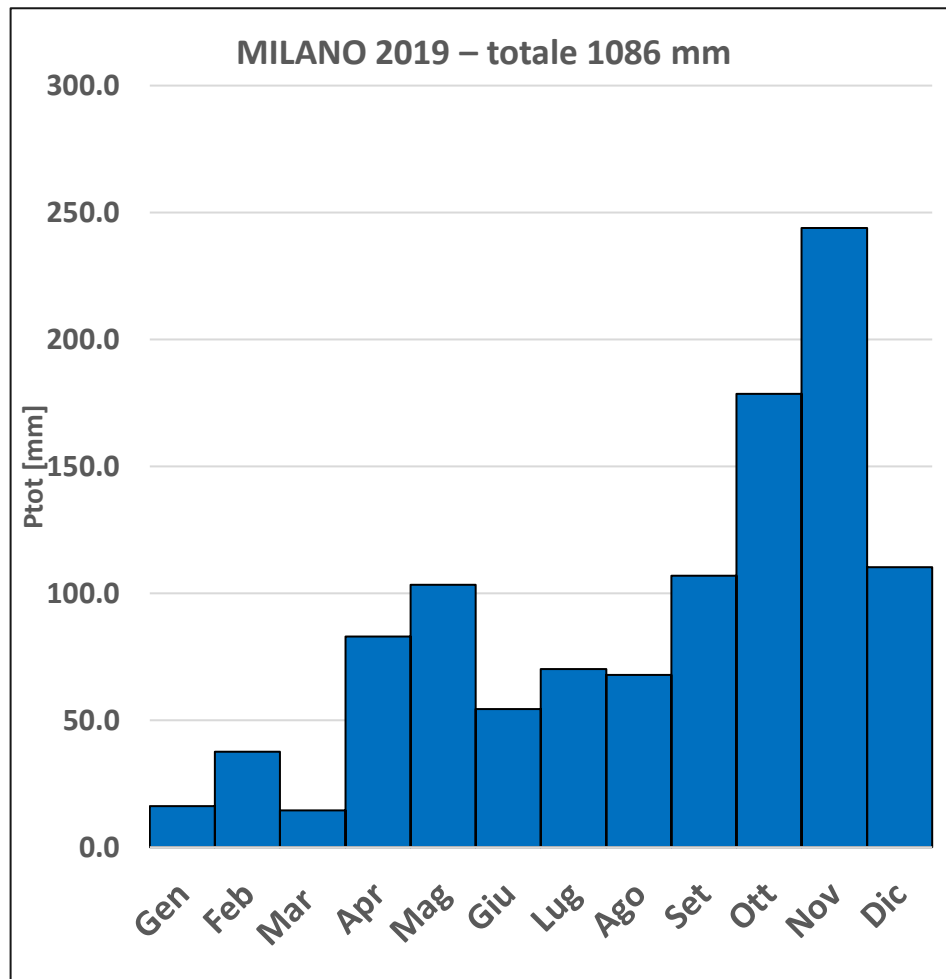
si hanno quando una massa d'aria sale rapidamente verso l'alto quasi verticalmente perché si trova ad essere più calda dell'aria circostante. La risalita continua finché l'aria non incontra altra aria con la stessa temperatura. Durante la fase ascendente la massa d'aria si raffredda e una volta che il vapore condensa si verifica la precipitazione. Il fenomeno è accentuato dalle "isole di calore". Le precipitazioni sono in genere di breve durata e forte intensità

## Orografiche

Si generano quando una massa d'aria incontra una barriera come quella delle Alpi nella Pianura Padana. L'aria tende a risalire il rilievo montuoso e salendo di quota si espande e si raffredda così il vapore acqueo condensa. Una volta raggiunta la saturazione si manifesta la precipitazione. Ciò avviene nel versante sopravvento, cioè quello esposto al vento dominante (investito dalla massa d'aria). Sull'altro versante, quello sottovento, la massa d'aria asciutta, una volta superato il crinale, ridiscende (a parità di volume pesa di più l'aria secca dell'aria umida) liberando energia sottoforma di calore (fohn)

**REGIMI PLUVIOMETRICI:** rappresentano la distribuzione media mensile della precipitazione media annua registrata in un'area con determinate caratteristiche climatiche

Per la Pianura Padana: regime intermedio tra sublitorale alpino e appenninico



# CURVE DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA

Procedimento basato sull'inferenza statistica: a partire da un campione di dati si definisce una funzione di distribuzione di probabilità, che rappresenti una popolazione potenzialmente infinita, i cui parametri vengono stimati dalle caratteristiche del campione

ANNO	ALTEZZE MASSIME [mm]		
	1 ORA	3 ORE	12 ORE
1928	16.2	21	60
1929	13.6	38.4	43.6
1930	13.8	23.8	38.6
1931	22.6	40	70.9
1934	15.2	26.2	51.2
1936	16.8	25	37.4
1937	21.8	31.4	34.2
1938	18.2	18.2	22
...	...	...	...

Campione di dati di altezze di pioggia massime per varie durate in n anni

Fattore tempo di ritorno

Ogni possibile combinazione di altezza-durata-tempo di ritorno

$$h = a * \theta^n$$

h = altezza di pioggia [mm]  
θ = durata evento [ore]



MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI  
SERVIZIO IDROGRAFICO

UFFICIO IDROGRAFICO DEL PO - PARMA

DIRETTORE DELL'UFFICIO: PROF. ING. MARCO VISENTINI

DIRETTORI DELLE SEZIONI: ING. ERNESTO MAROTTA (PARMA) - ING. SECONDO ALPIERI (TORINO) - ING. GIUSEPPE MERLA (MILANO)

# ANNALI IDROLOGICI

1938

PARTE PRIMA

ROMA  
ISTITUTO POLIGRAFICO DELLO STATO  
LIBRERIA  
1938 - ANNO XVII

# INDICE

<b>Segni convenzionali ed abbreviazioni - Contenuto delle tabelle</b>	Pag.	5
TABELLA 1. - Pressione atmosferica ridotta a 0°	"	13
TABELLA 2. - Direzione e velocità media del vento	"	17
TABELLA 3. - Stato medio del cielo	"	21
TABELLA 4. - Temperatura media giornaliera	"	25
TABELLA 5. - Valori medi, estremi, escursioni e frequenze delle temperature	"	29
TABELLA 6. - Temperatura massima e minima in alcune stazioni del bacino padano	"	33
TABELLA 7. - Precipitazioni meteoriche giornaliera, decadiche e mensili	"	81
TABELLA 8. - Precipitazioni misurate ai pluviometri totalizzatori	"	309
TABELLA 9. - Totali mensili, stagionali ed annui delle precipitazioni e numero dei giorni piovosi; medie dei totali annui, precedenti e scostamenti	"	312
TABELLA 10. - Ripartizione dei giorni piovosi in relazione all'entità delle precipitazioni misurate	"	332
TABELLA 11. - Precipitazioni di massima intensità	"	337
TABELLA 12. - Precipitazioni di notevole intensità e breve durata	"	339
TABELLA 13. - Giorni consecutivi con precipitazione nulla o molto bassa	"	340
TABELLA 14. - Strato nevoso - Precipitazione ed altezza sul suolo - Valori mensili	"	342
TABELLA 15. - Strato nevoso - Durata di permanenza sul suolo	"	348
TABELLA 16. - Elenco delle stazioni meteorologiche per l'anno 1938	"	358
<b>Carta orografica e carte stagionali ed annua delle piogge.</b>		

**Notevole intensità e breve durata (1, 3, 6, 12, 24 ore)**

**Più giorni consecutivi (1, 2, 3, 4, 5 giorni)**

*N. B. - I dati relativi alle stazioni del bacino del Po ricadenti nel territorio della Svizzera vengono comunicati dalla Stazione Centrale Svizzera di Meteorologia di Zurigo.*

BACINO E STAZIONE	Altezza sul mare m.	INTERVALLO DI ORE														
		1		3		6		12		24						
		mm.	Inizio		mm.	Inizio		mm.	Inizio		mm.	Inizio				
			giorno	ora		giorno	ora		giorno	ora		giorno	ora			
Garda e Mincio																
Madonna di Camp.	1153	17.4	1 ago.	0.00	18.8	29 lug.	10.30	22.6	29 lug.	11.00	35.2	9 sett.	22.00	51.8	9 set.	15.00
Riva . . . . .	70	19.0	1 ago.	16.20	26.0	1 ago.	16.20	26.2	22 nov.	5.00	45.4	21 nov.	20.20	67.6	21 nov.	11.00
Bezzecca . . . . .	698	18.0	2 ago.	18.00	22.4	31 lug.	1.00	35.2	20 mag.	11.30	40.0	20 dic.	18.00	69.4	20 dic.	11.00
Ceresara . . . . .	43	31.2	13 giu.	4.00	34.2	13 giu.	2.00	34.4	13 giu.	2.00	43.0	12 giu.	18.00	58.8	12 giu.	7.20
Mantova . . . . .	20	52.0	19 lug.	1.20	58.6	19 lug.	1.00	62.0	18 lug.	23.00	62.8	18 lug.	23.00	—	—	—

# CURVE DI POSSIBILITA' PLUVIOMETRICA - PROCEDIMENTO

- 1) Ipotizzare distribuzione del campione (varie possibilità)
- 2) Calcolo media, varianza, scarto quadratico medio, ...
- 3) Calcolo parametri della distribuzione
- 4) Calcolo fattore di frequenza  $K_t$  (con tempo di ritorno)
- 5) Calcolo  $h$
- 6) Grafico altezza-durata per ricavare con interpolazione i parametri  $a$  e  $n$

## TEMPO DI RITORNO - TR

Tempo MEDIO che intercorre tra due eventi di uguale intensità. È legato alla probabilità di accadimento e alla magnitudo dell'evento

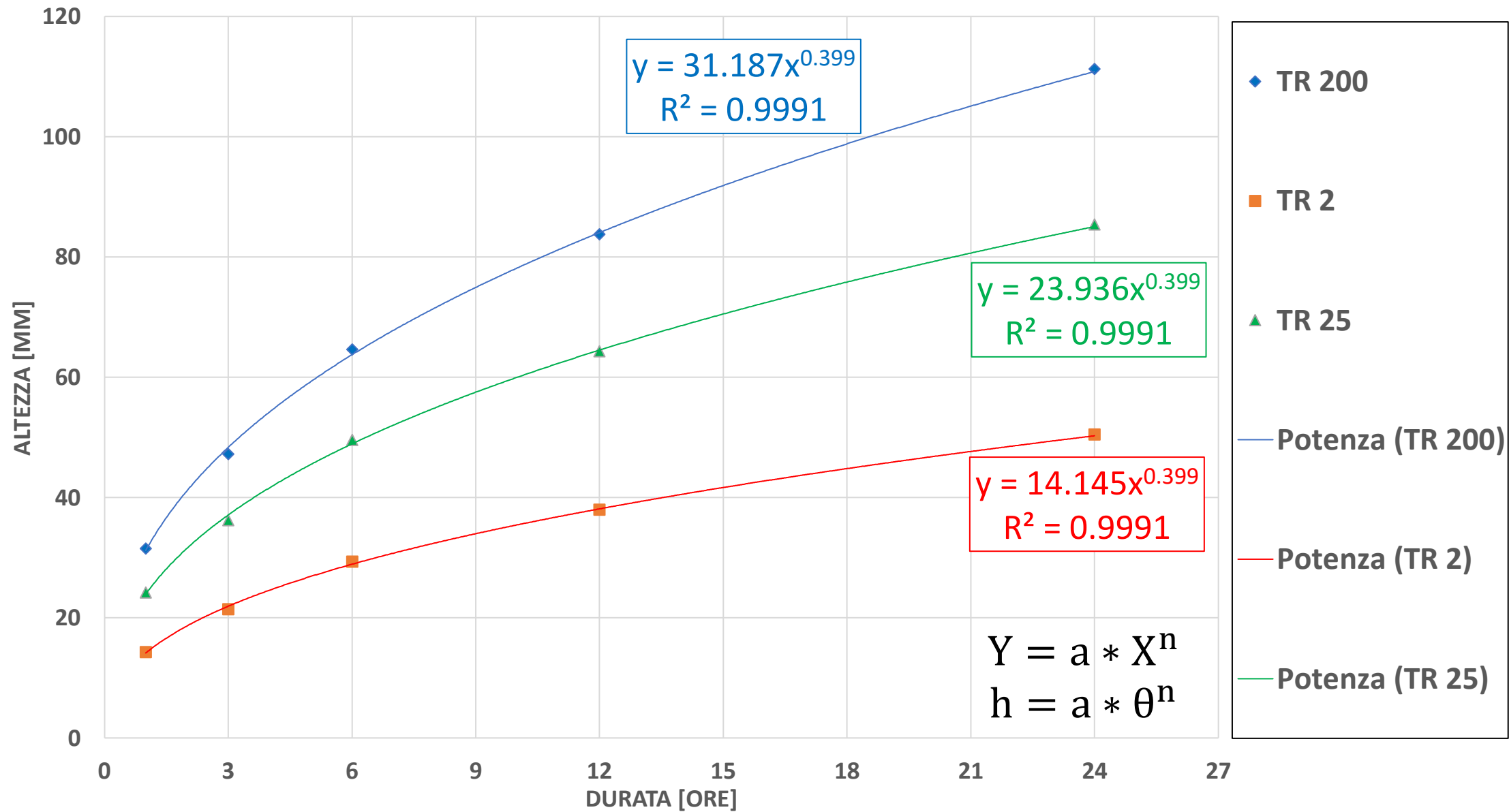
Probabilità di superamento  
in 1 anno

$$P = \frac{1}{TR}$$

Probabilità di superamento  
in N anni

$$P = 1 - [1 - (1/TR)^N]$$

<b>TIPO DI OPERA</b>	<b>TEMPO DI RITORNO [anni]</b>
Fognature	5-10
Cunette e fossi di guardia	10-20
Sistemi di drenaggio sostenibile (SUDS)	<30
Piene fluviali	10, 100, 200, 500
Ponti e difese spondali	100-150
Dighe	500-1000





ANNO	ALTEZZE MASSIME [mm]		
	1 ORA	3 ORE	12 ORE
1928	16.2	21	60
1929	13.6	38.4	43.6
1930	13.8	23.8	38.6
1931	22.6	40	70.9
1934	15.2	26.2	51.2
1935	15	23	54
1936	16.8	25	37.4
1937	21.8	31.4	34.2
1938	18.2	18.2	22
...	...	...	...
2001	16.6	17.8	34
2002	8.6	19.2	45.9



TR	n	a
2	0.399	14.145
25	0.399	23.936
200	0.399	31.187



$$h = a * \theta^n$$

h = altezza di pioggia [mm]  
θ = durata evento [ore]

http://idro.arpalombardia.it



# Portale Idrologico Geografico di ARPA Lombardia

[Link](#) [Stampa](#) [Scarica immagine](#) [Guida Utente](#)

**Legenda**

**Parametri 1-24 ore**

- A1 - Coefficiente pluviometrico orario
- < 16 mm
- 16 - 18 mm
- 18 - 20 mm
- 20 - 22 mm
- 22 - 24 mm
- 24 - 26 mm
- 26 - 28 mm
- 28 - 30 mm
- 30 - 32 mm
- > 32 mm

N - Coefficiente di scala  
 GEV - parametro alpha  
 GEV - parametro kappa  
 GEV - parametro epsilon

**H (mm) x durate 1-24 ore**

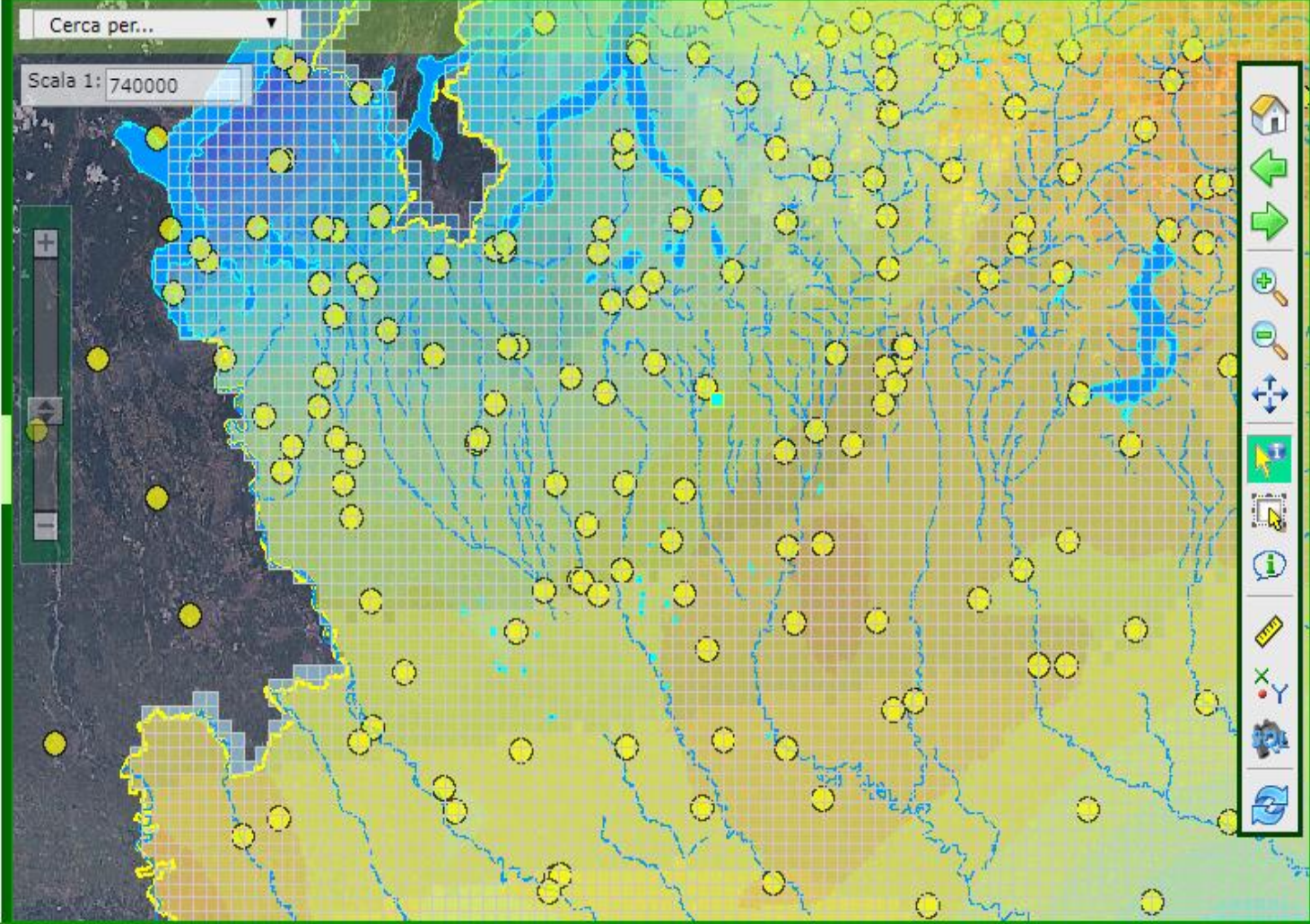
durate 1-24 ore

**Stazioni Progetto STRADA**

- Massimi annuali di Precipitazione 1-2

**Parametri 1-5 giorni**

- A1 - Coefficiente pluviometrico orario
- N - Coefficiente di scala
- W2 - Tempo di ritorno 2 anni
- W5 - Tempo di ritorno 5 anni
- W10 - Tempo di ritorno 10 anni
- W20 - Tempo di ritorno 20 anni



- Ultimi dati registrati
- Precipitazione - accesso ai dati
- Temperatura - accesso ai dati
- Livello idrometrico - accesso ai dati
- Altezza neve - accesso ai dati
- Dati storici - rete meccanica
- Colmi e Portate - P.FLORA
- Linee segnalatrici 1-24 ore - P.STRADA
  - Parametri 1-24 ore
  - H (mm) x durate 1-24 ore
  - Stazioni Progetto STRADA
- Linee segnalatrici 1-5 giorni
  - Parametri 1-5 giorni
- Idrologia
- Bilancio idrico
- Trasporto solido
- Dati amministrativi

## Legenda

### Parametri 1-24 ore

A1 - Coefficiente pluviometrico orario

- 1
- 1
- 2
- 2
- 2
- 2
- 2
- 2
- 3
- 3
- 3

**Risultato** ✕

**Livello: Parametri 1-24 ore**

Parametro	Valore
A1 - Coefficiente pluviometrico orario	30.860001
N - Coefficiente di scala	0.3055
GEV - parametro alpha	0.2951
GEV - parametro kappa	-0.0251
GEV - parametro epsilon	0.82169998

Esporta risultato come

File Modifica Formato Visualizza ?

```

|"#, ""Parametro"", ""Valore""
|r, ""A1 - Coefficiente pluviometrico orario"", ""30.860001""
|r, ""N - Coefficiente di scala"", ""0.3055""
|r, ""GEV - parametro alpha"", ""0.2951""
|r, ""GEV - parametro kappa"", ""-0.0251""
|r, ""GEV - parametro epsilon"", ""0.82169998""
  
```

GEV - parametro epsilon



# Calcolo della linea segnatrice 1-24 ore

Località: .....  
 Coordinate: .....

Linea segnalatrice

Tempo di ritorno (anni)

Parametri ricavati da: <http://idro.arpalombardia.it>

- A1 - Coefficiente pluviometrico orario
- N - Coefficiente di scala 0.3055
- GEV - parametro alpha 0.2951
- GEV - parametro kappa -0.0251
- GEV - parametro epsilon 0.82169998

Evento pluviometrico

Durata dell'evento [ore]   
 Precipitazione cumulata [mm]

Formulazione analitica

$$h_T(D) = a_1 w_T D^n$$

$$w_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right]^k \right\}$$

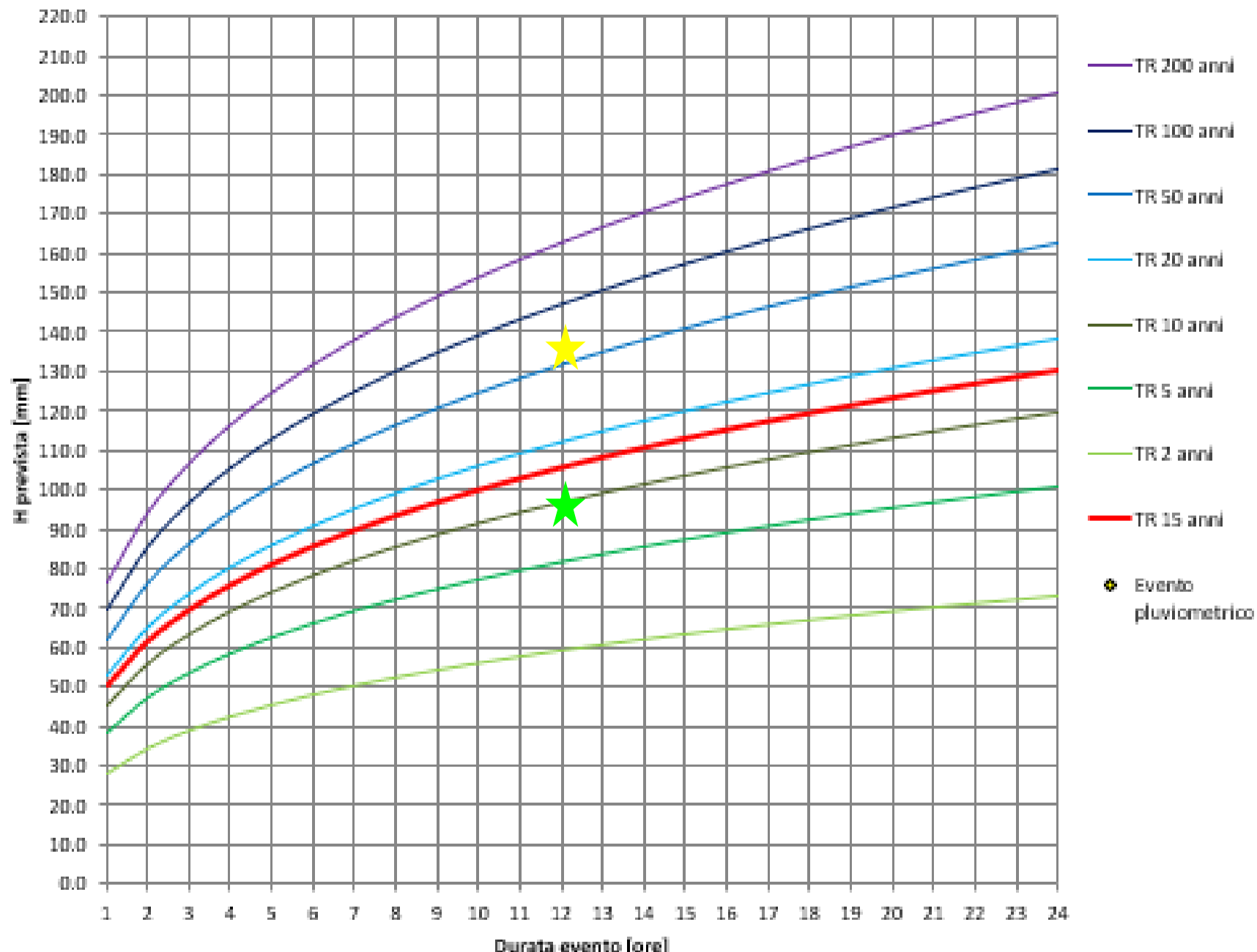
Bibliografia ARPA Lombardia:

- <http://idro.arpalombardia.it/manual/lsp.pdf>
- [http://idro.arpalombardia.it/manual/STRADA\\_report.pdf](http://idro.arpalombardia.it/manual/STRADA_report.pdf)

## Tabella delle precipitazioni previste al variare delle durate e dei tempi di ritorno

Tr	2	5	10	20	50	100	200	15
w <sub>T</sub>	0.93036	1.27277	1.50490	1.73170	2.03144	2.26068	2.49312	1.63780275
Durata (ore)	TR 2 anni	TR 5 anni	TR 10 anni	TR 20 anni	TR 50 anni	TR 100 anni	TR 200 anni	TR 15 anni
1	28.7	39.3	46.4	53.4	62.7	69.8	76.9	50.5425929
2	35.5	48.5	57.4	66.0	77.5	86.2	95.1	62.4629054
3	40.2	54.9	65.0	74.8	87.7	97.6	107.6	70.6997798

## Linee segnalatrici di probabilità pluviometrica



Precipitazione cumulata a Milano in 12 ore (14-15 maggio 2020):

- ★ Via Rosellini: 96 mm
- ★ Piazza Zavattari: 133 mm

# Valori parametri a e n ricavati da CPP ARPA per la stazione di Paderno Dugnano

< 1 ora \*

TR	n	a
2	0.4369	28.39904
5	0.4369	38.85115
10	0.4369	45.93679
20	0.4369	52.86007
50	0.4369	62.00931
100	0.4369	69.00701
200	0.4369	76.1022

1 - 24 ore

TR	n	a
2	0.3055	28.71082
5	0.3055	39.27768
10	0.3055	46.44111
20	0.3055	53.4404
50	0.3055	62.69009
100	0.3055	69.76461
200	0.3055	76.93770

1 - 5 giorni

TR	n	a
2	0.3761	63.54059
5	0.3761	82.58414
10	0.3761	96.19756
20	0.3761	110.09432
50	0.3761	129.43292
100	0.3761	145.04166
200	0.3761	160.45373

\* Ottenuti da relazione pioggia di durate inferiori all'ora e pioggia oraria da stazione di Milano-Monviso

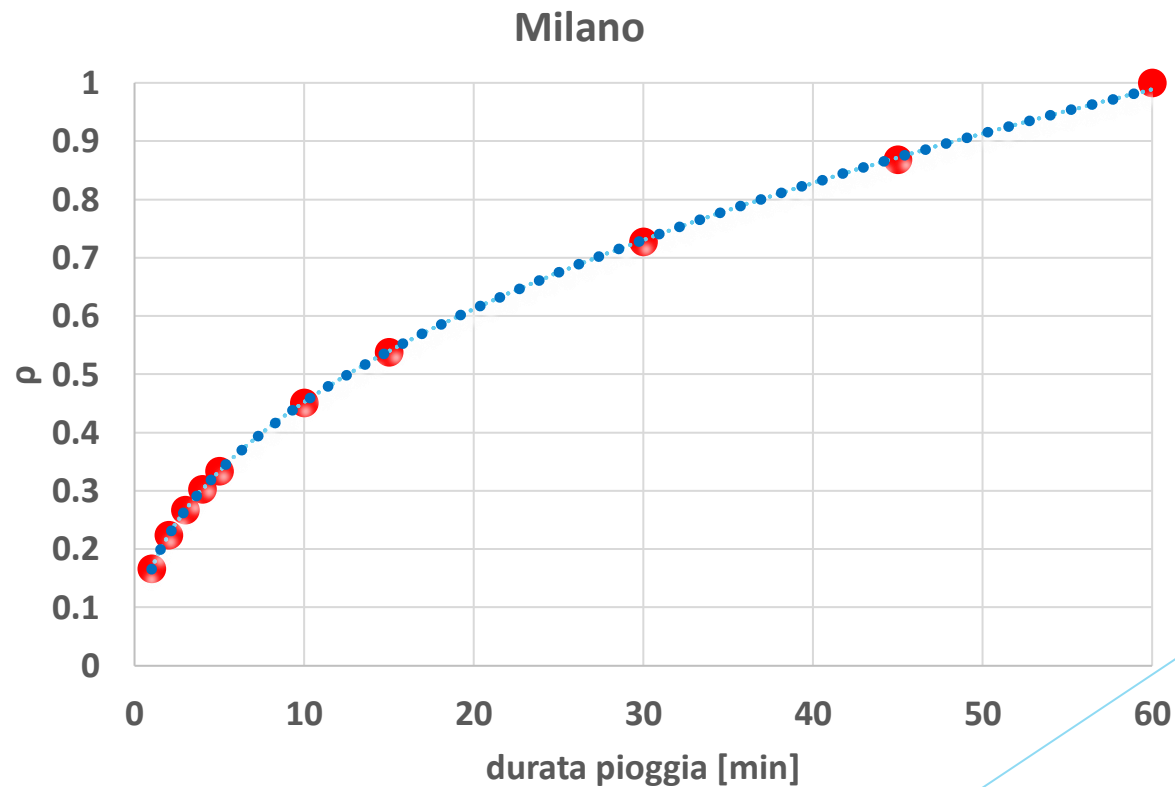
## Costruzione Cpp Per Durate < 1 Ora

Esistono correlazioni tra le altezze d'acqua massime associate ad eventi inferiori all'ora e quelle relative ad eventi non superiori alle 2 ore. Tale correlazione è poco dipendente dalla località ed è espressa da:

$$\rho(t) = h(t)/h(1)$$

$\rho(t)$  da grafico

t [min]	$\rho$ [-]
1	0.17
2	0.22
3	0.27
4	0.30
5	0.33
10	0.45
15	0.54
30	0.73
45	0.87
60	1.00



# METODI DI STIMA AREALE

EVENTI MEDI



PIOGGIA MEDIA AREALE ( $P_A$ )

$$P_A = \sum_{i=1}^N w_i * p_i$$

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1, w_i > 0$$

- Media aritmetica
- Griglia
- Isoiete
- Poligoni
- Geostatistico

EVENTI ESTREMI

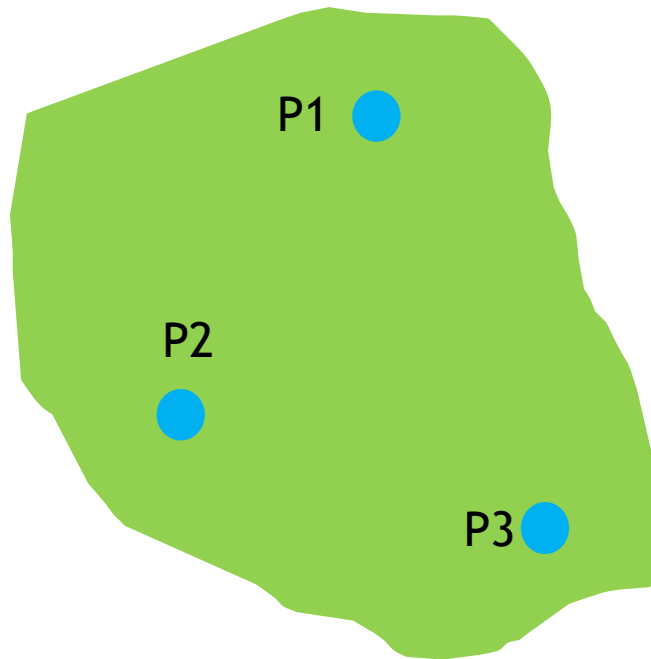


FATTORE DI RIDUZIONE AREALE

$$ARF(\theta, A) = \frac{H(\theta, A)}{H(\theta, A_0)}$$



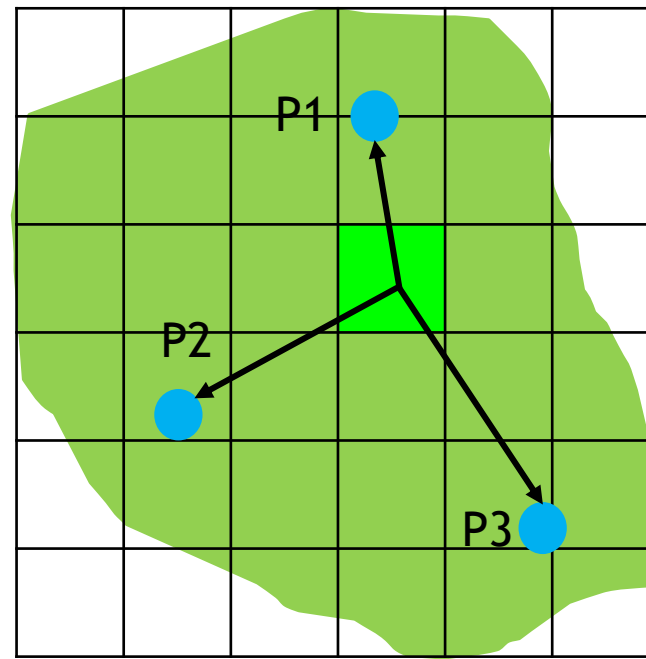
## MEDIA ARITMETICA



$$w_i = \frac{1}{N}$$

$$P_A = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N p_i$$

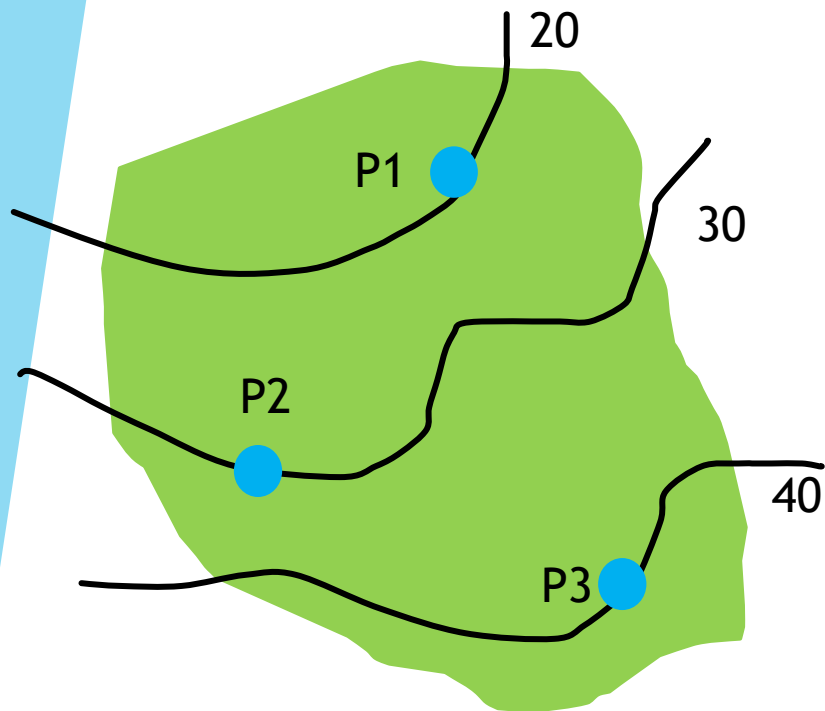
## GRIGLIA Regolare – distanza quadratica inversa



$$w_i = \frac{\frac{1}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}}$$

$$P_A = \sum_{i=1}^N \frac{\frac{1}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}} * p_i$$

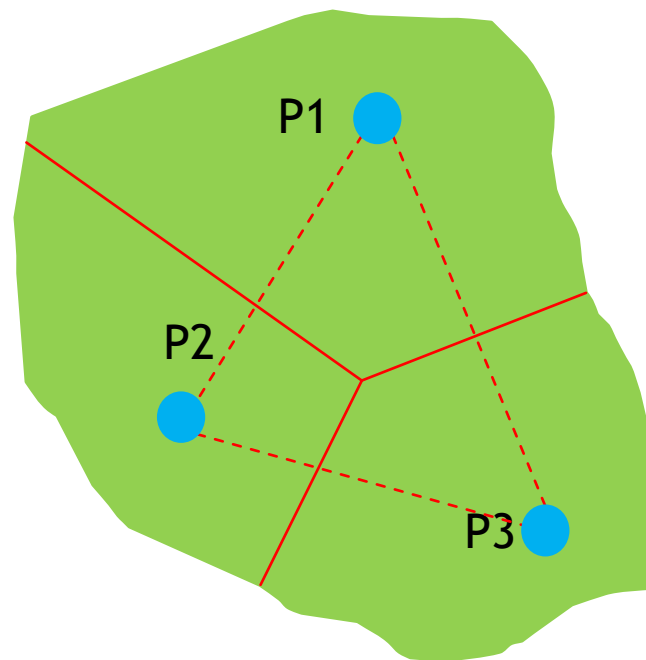
## ISOIETE



$$w_i = \frac{a_i}{A} \quad p_{mi} = \frac{\Delta P}{2}$$

$$P_A = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{A} * p_{mi}$$

## TOPOIETI



$$w_i = \frac{a_i}{A}$$

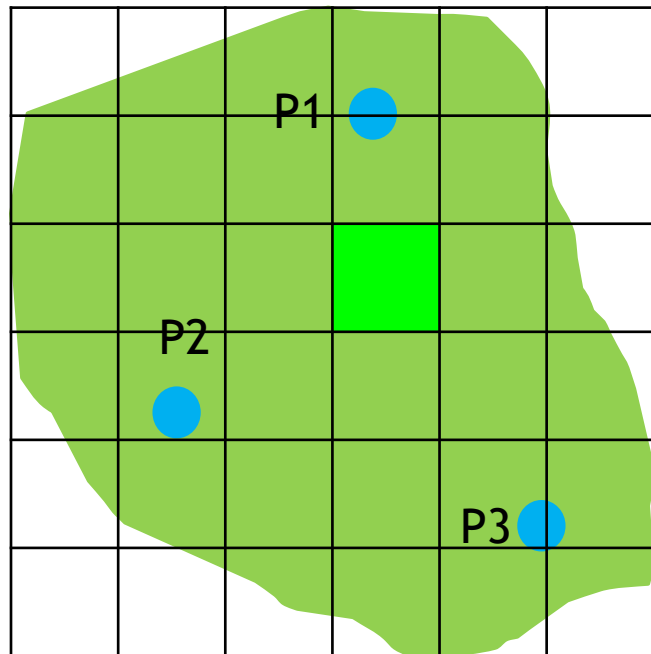
$$P_A = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{A} * p_i$$

## GEOSTATISTICO (KRIGING):

dati tra loro spazialmente vicini sono correlati, dati distanti tra loro sono sostanzialmente indipendenti. Permette di stimare il valore incognito di una variabile in un punto dello spazio, noto uno o più valori della variabile stessa in altri punti, minimizzando l'errore nella stima.

Procedimento:

- 1) si definisce una variabile regionalizzata che rappresenti la variabile in tutti i punti del bacino  $P(x)$
- 2) si calcola il variogramma del campione, tenendo conto di altri processi di dipendenza della variabile (ad es. quota)
- 3) si determina il variogramma modello
- 4) si definisce la risoluzione spaziale (griglia)
- 5) si calcola la variabile:



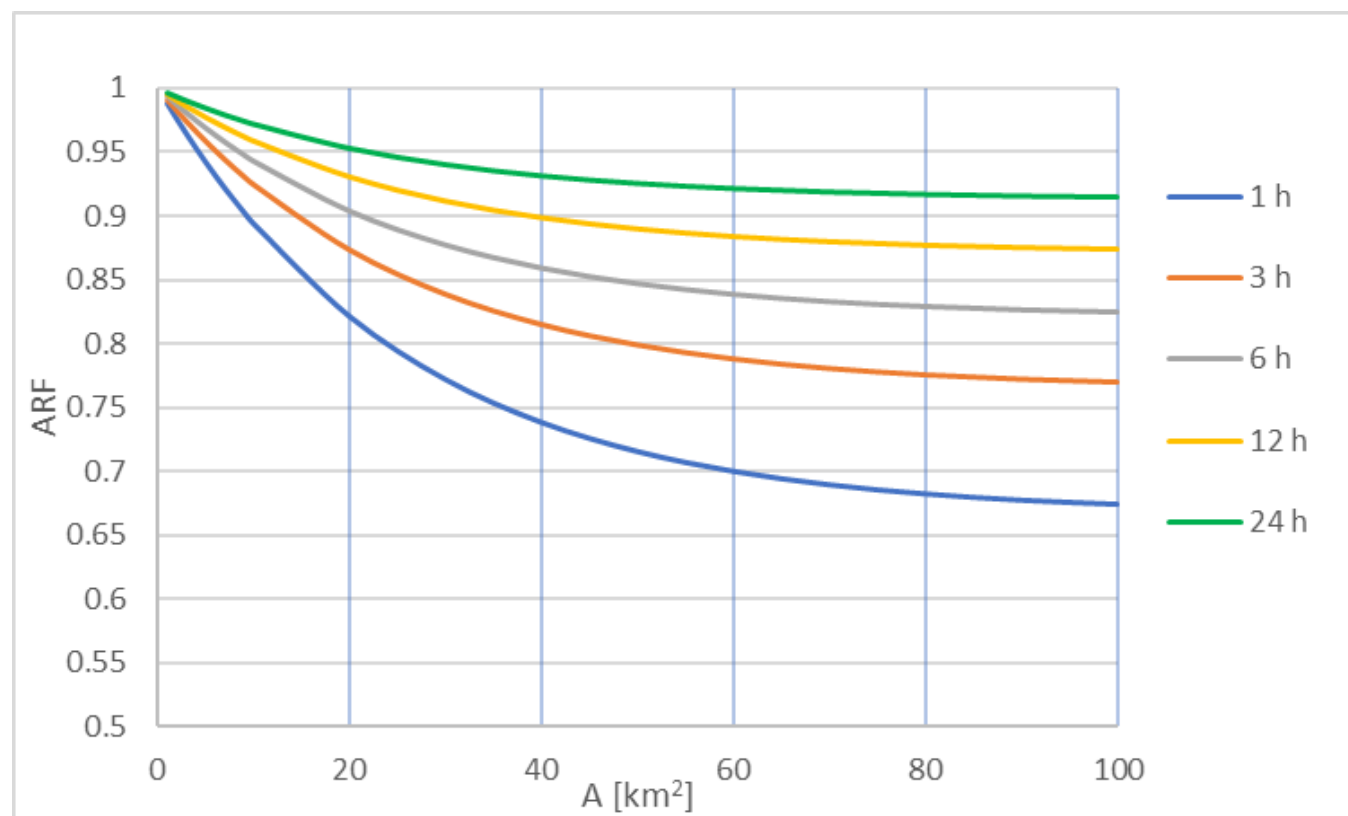
$$\hat{P}(u_a) = \sum_{i=1} w_i * P(u_i)$$

## FATTORE DI RIDUZIONE AREALE (per aree > 1 km<sup>2</sup>)

$$ARF(\theta, A) = \frac{H(\theta, A)}{H_0(\theta, A_0)} < 1$$

H = altezza precipitazione media per area A [mm]  
 H<sub>0</sub> = altezza precipitazione puntuale (centro di scroscio) [mm]  
 θ = durata [ore]

$$ARF = 1 - e^{(-1.1 * \theta^{0.25})} + e^{(-1.1 * \theta^{0.25} - 0.386 * A)} \quad \text{U.S. Weather Bureau}$$



Ipotesi: centro di scroscio coincide con stazione pluviometrica

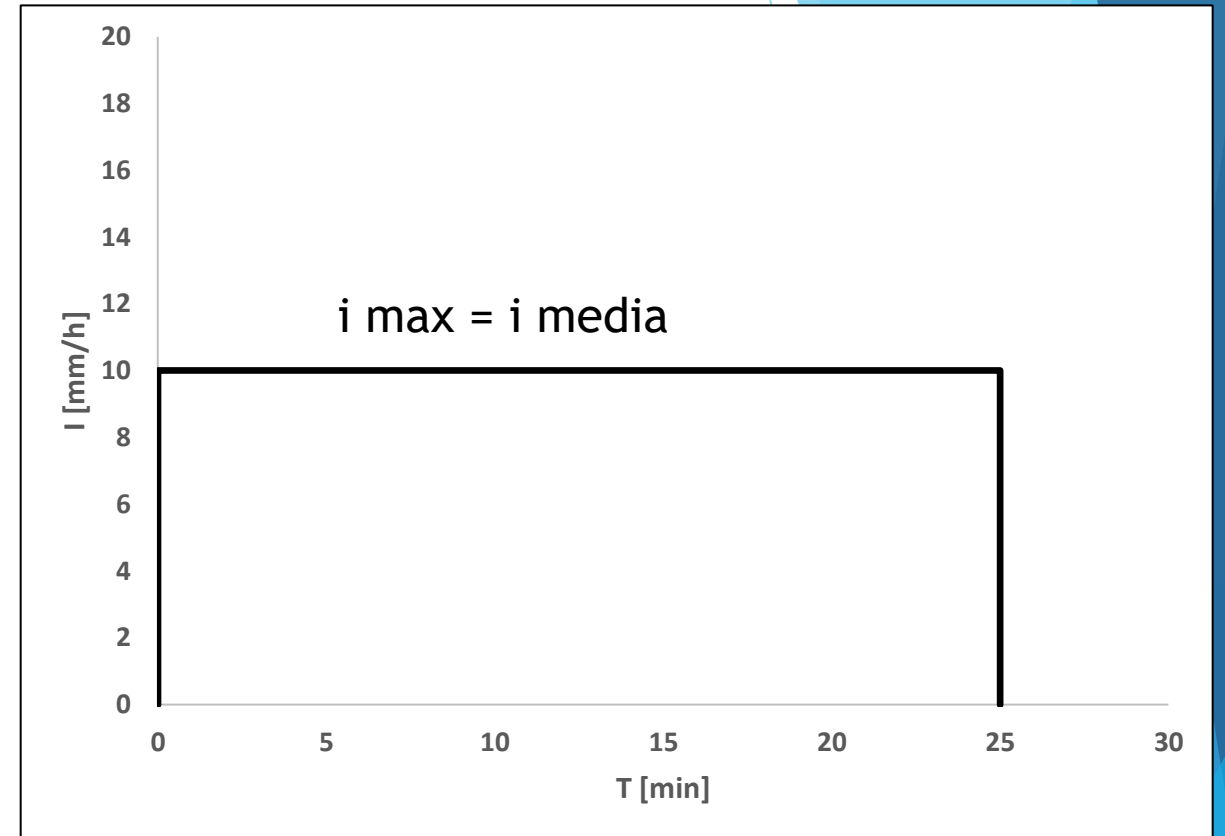
ARF diminuisce all'aumentare dell'area e al diminuire della durata di pioggia

# IETOGRAMMI

## COSTANTE

$$i(t) = a * \theta^{n-1}$$

$$h(t) = a * \theta^n$$



## TRIANGOLARE

$$i(t) = 2 * a * \theta^{n-2} * \left(\frac{t}{k}\right)$$

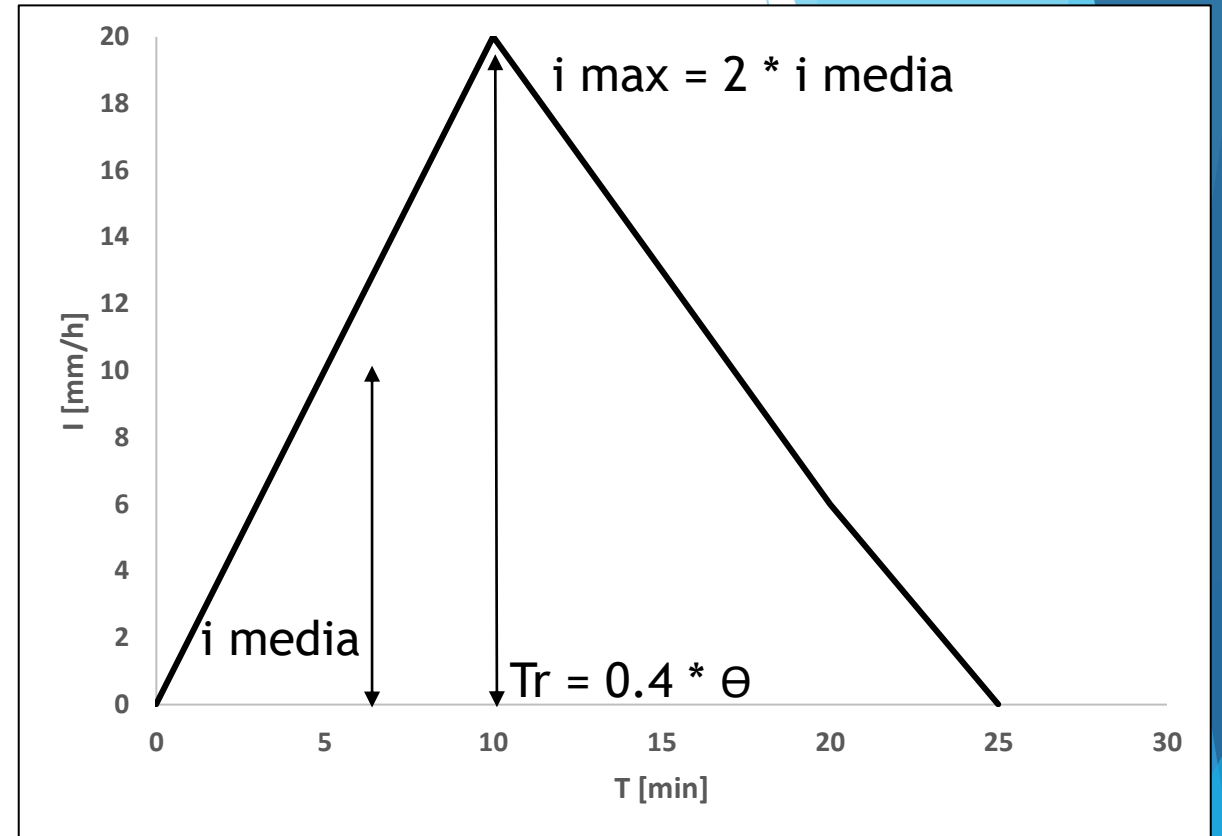
$$h(t) = a * \theta^{n-2} * \left(\frac{t^2}{k}\right)$$

$$i(t) = 2 * a * \theta^{n-2} * \left(\frac{\theta-t}{1-k}\right)$$

$$h(t) = \theta^{n-2} * \left[\theta^2 - \frac{(\theta-t)^2}{1-k}\right]$$

$$t \leq t_r$$

$$t > t_r$$



$t_r = \text{tempo di picco} = K * \theta$   
 Ipotesi:  $K = 0.4$

## CHICAGO

$$i(t) = n * a * \left(\frac{t_r - t}{k}\right)^{n-1}$$

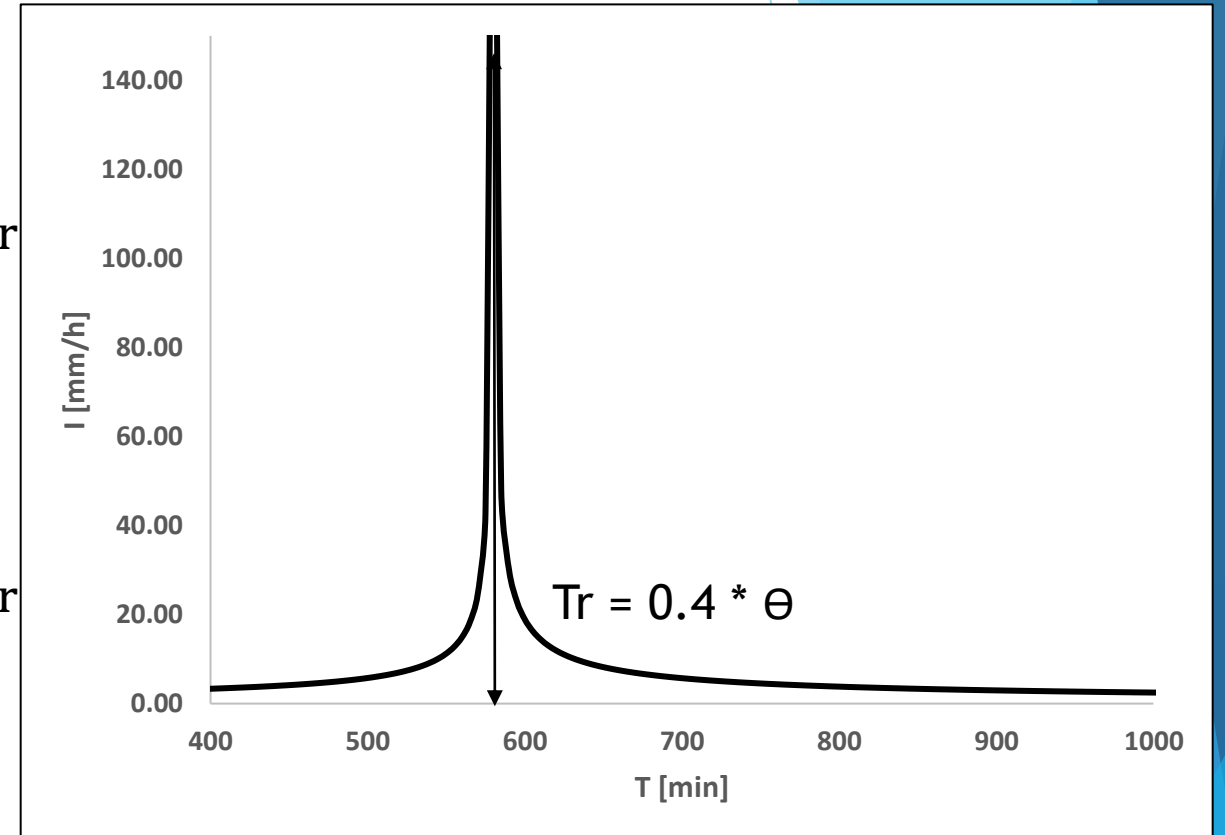
$$h(t) = k * a * \left[ \left(\frac{t_r}{k}\right)^n - \left(\frac{t_r - t}{k}\right)^n \right]$$

$$i(t) = n * a * \left(\frac{t - t_r}{1 - k}\right)^{n-1}$$

$$h(t) = a * \left[ k * \left(\frac{t_r}{k}\right)^n + (1 - k) * \left(\frac{t - t_r}{1 - k}\right)^n \right]$$

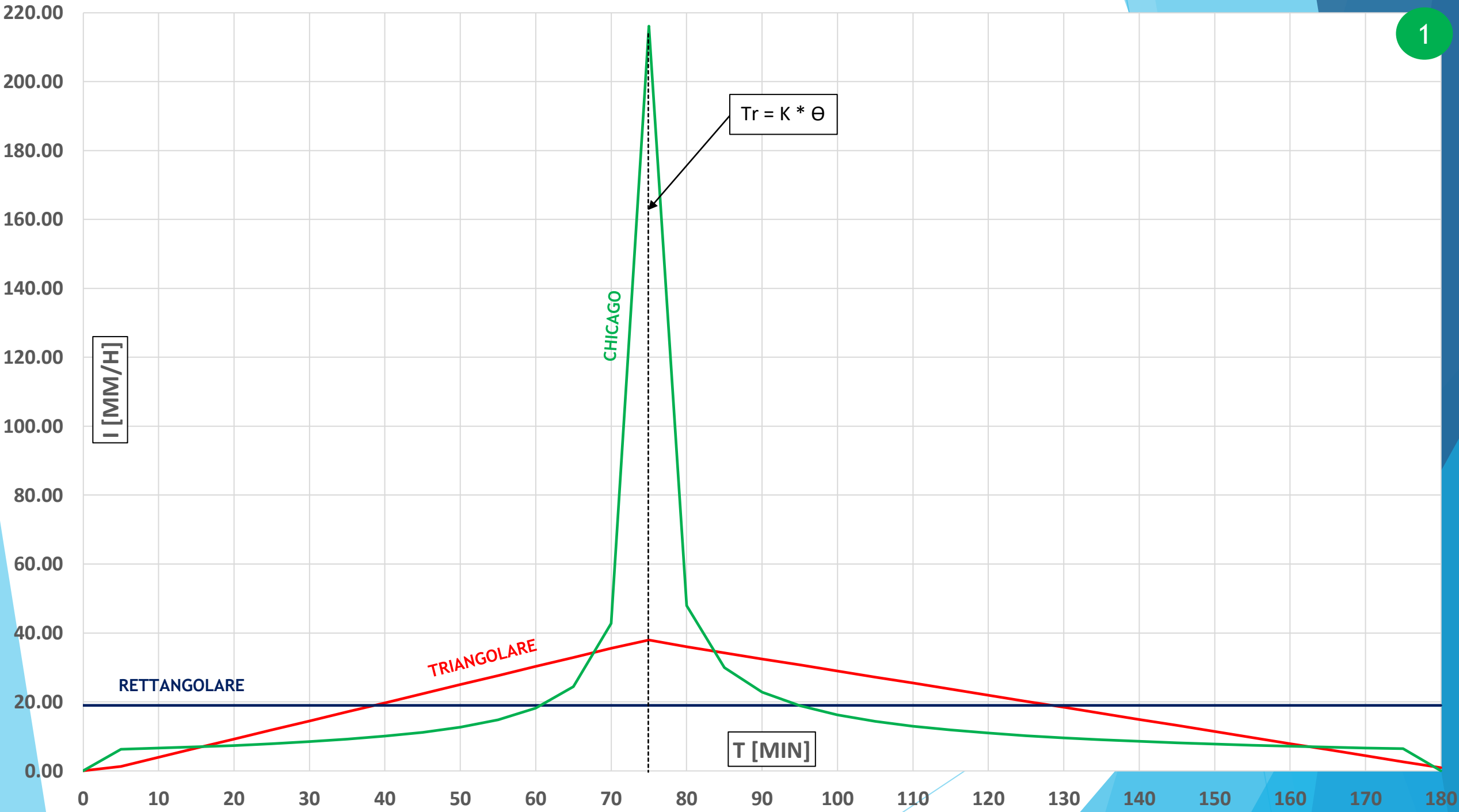
$t \leq t_r$

$t > t_r$



$t_r = \text{tempo di picco} = K * \Theta$

Ipotesi:  $K = 0.4$





# PERDITE IDROLOGICHE

$$P + D_{Sin} - D_{out} - D_{sout} - ET - I - Veg - Acc = 0$$

$$Q = P - \underbrace{ET - I - Veg - Acc}_{\text{Perdite idrologiche}}$$

Perdite idrologiche



Modelli di infiltrazione:

- Horton
- Green-Ampt
- SCS-CN

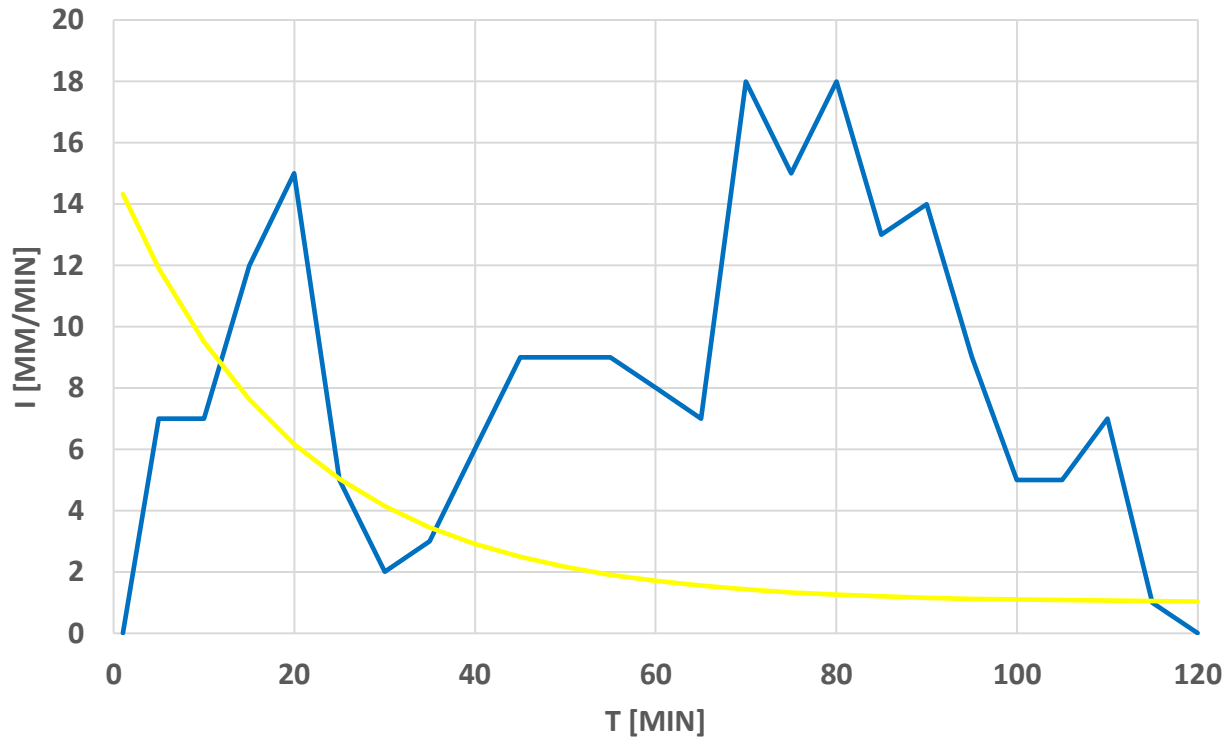
Modelli semplificati di perdite idrologiche:

- Orizzontale
- Verticale
- Percentuale

- ET (evapotraspirazione): trascurabile per eventi meteorici brevi e intensi
- Acc (accumulo nelle depressioni superficiali) e Veg (intercettazione vegetale) : difficilmente superiori ai 2 mm
- I (infiltrazione): è il parametro idrologicamente più importante, calcolata con appositi modelli

# HORTON

1933 – il valore di infiltrazione tende nel tempo ad un valore asintotico



$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) * e^{(-a*t)}$$

$f(t)$ =tasso di infiltrazione [mm/min]

$f_c$ =capacità di infiltrazione asintotica [mm/min]

$f_0$ =capacità di infiltrazione iniziale [mm/min]

$a$ =costante di esaurimento [1/min]

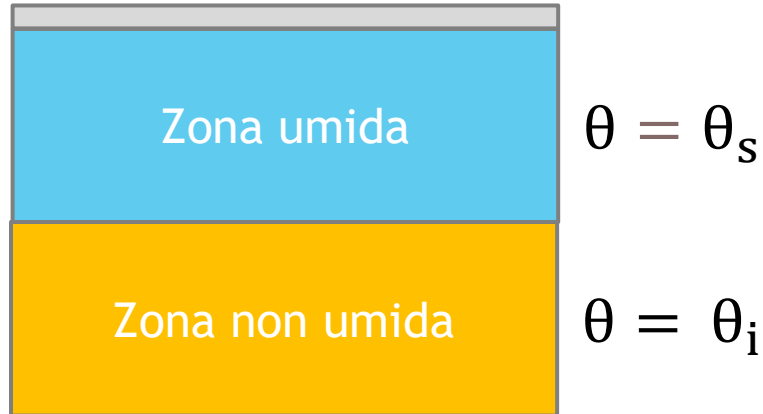
$t$ =tempo [min]

SUOLI	DESCRIZIONE	FO [mm/h]	Fc [mm/h]	alpha [h-1]
A	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla; anche ghiaie profonde, molto permeabili	250	25.4	2
B	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A. Il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione	200	12.7	2
C	Potenzialità di deflusso moderatamente alta. Comprende suoli sottili e suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se meno che nel gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità di infiltrazione a saturazione	125	6.3	2
D	Potenzialità di deflusso molto alta. Comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in superficie	76	2.5	2

(Parametri della formula di Horton secondo il modello ILLUDAS)

# GREEN - AMPT

1911 – l'infiltrazione è funzione del contenuto di umidità nel suolo



$F(t)$  = infiltrazione cumulata [mm]  
 $K_s$  = conducibilità idraulica [mm/min]  
 $\psi_s$  = carico di suzione [mm]  
 $\theta_d$  = contenuto di umidità [/]  
 $\theta_s$  = contenuto di umidità alla saturazione [/]  
 $\theta_i$  = contenuto di umidità iniziale [/]

$$F(t) = K_s + \psi_s * \theta_d * \ln \left( 1 + \frac{F(t)}{\psi_s * \theta_d} \right)$$

(equazione implicita)

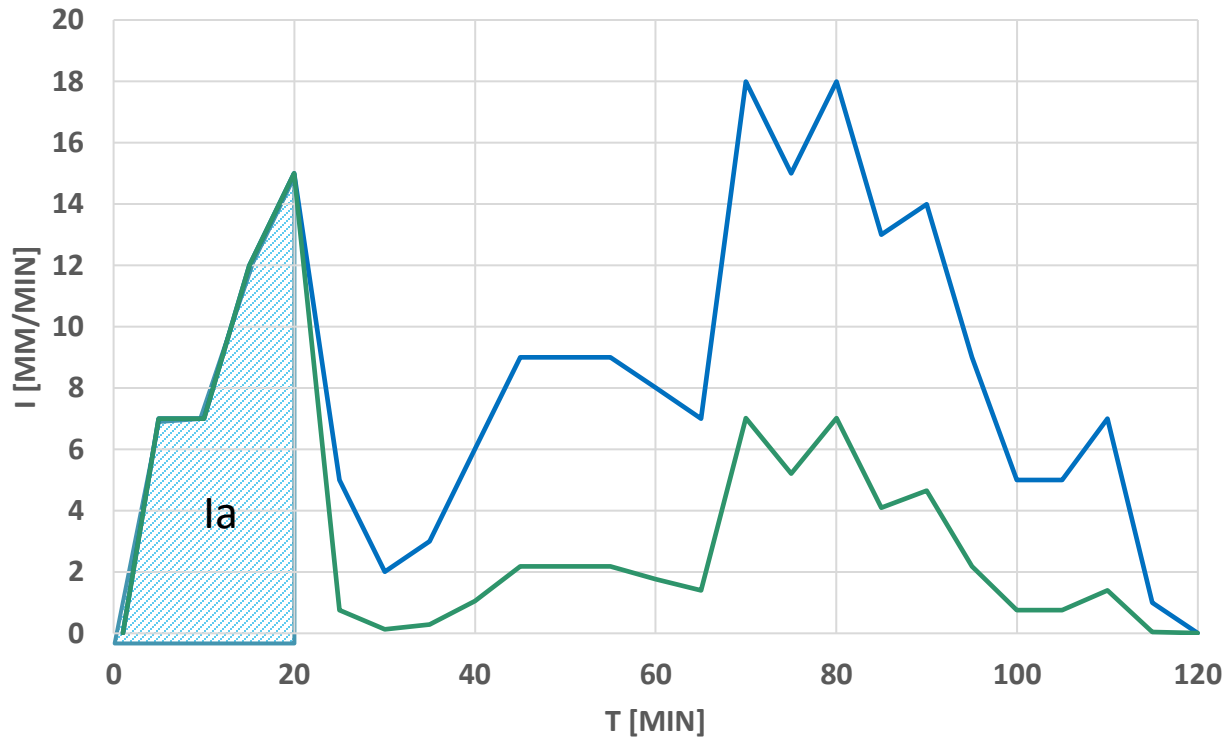
$$\theta_d = \theta_s - \theta_i$$

Suolo	Ks [mm/hr]	$\Psi$ [mm]
sabbioso	120.396	49.022
sabbioso franco	29.972	60.96
franco sabbioso	10.922	109.982
franco	3.302	88.9
franco limoso	6.604	169.926
franco argilloso sabbioso	1.524	219.964
franco argilloso	1.016	210.058
franco argilloso limoso	1.016	270.002
argilloso sabbioso	0.508	240.03
argilloso limoso	0.508	290.068
argilloso	0.254	320.04

Rawls, W.J. et al., (1983).

# SCS-CN: Soil Conservation Service – Curve Number

1972 – il valore di infiltrazione dipende da tipologia, contenuto di umidità e uso del suolo



$$P_n(t) = \frac{(P(t) - I_a)^2}{P(t) - I_a + S}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

$P_n(t)$  = precipitazione netta [mm]

$P(t)$  = precipitazione [mm]

$S$  = volume infiltrato [mm]

CN = 'curve number', dipende dal tipo di terreno:

(permeabile)  $0 < CN < 100$  (impermeabile)

$I_a$  = 'Initial abstraction' (accumulo nelle depressioni + intercettazione vegetazione)

- Per bacini rurali:  $I_a = 0.2 * S$
- Per bacini urbani:  $I_a = 2-3 \text{ mm}$

Curve Number  $\uparrow$  quando:

- Permeabilità suolo  $\downarrow$
- Antropizzazione  $\uparrow$
- Umidità suolo  $\uparrow$

CN  $\uparrow$   $\rightarrow$  infiltrazione  $\downarrow$   $\rightarrow$  precipitazione netta  $\uparrow$



Considerando anche la condizione di umidità del suolo, il CN viene ricalcolato a seconda dell'altezza di pioggia registrata nei 5 giorni precedenti all'evento (AMC=Antecedent Moisture Conditions)

CLASSE AMC	Stagione di riposo	Stagione di crescita
I	<12.7 mm	<35.5 mm
II	12.7 – 28.0 mm	35.5 – 53.3 mm
III	>28.0 mm	>53.3 mm

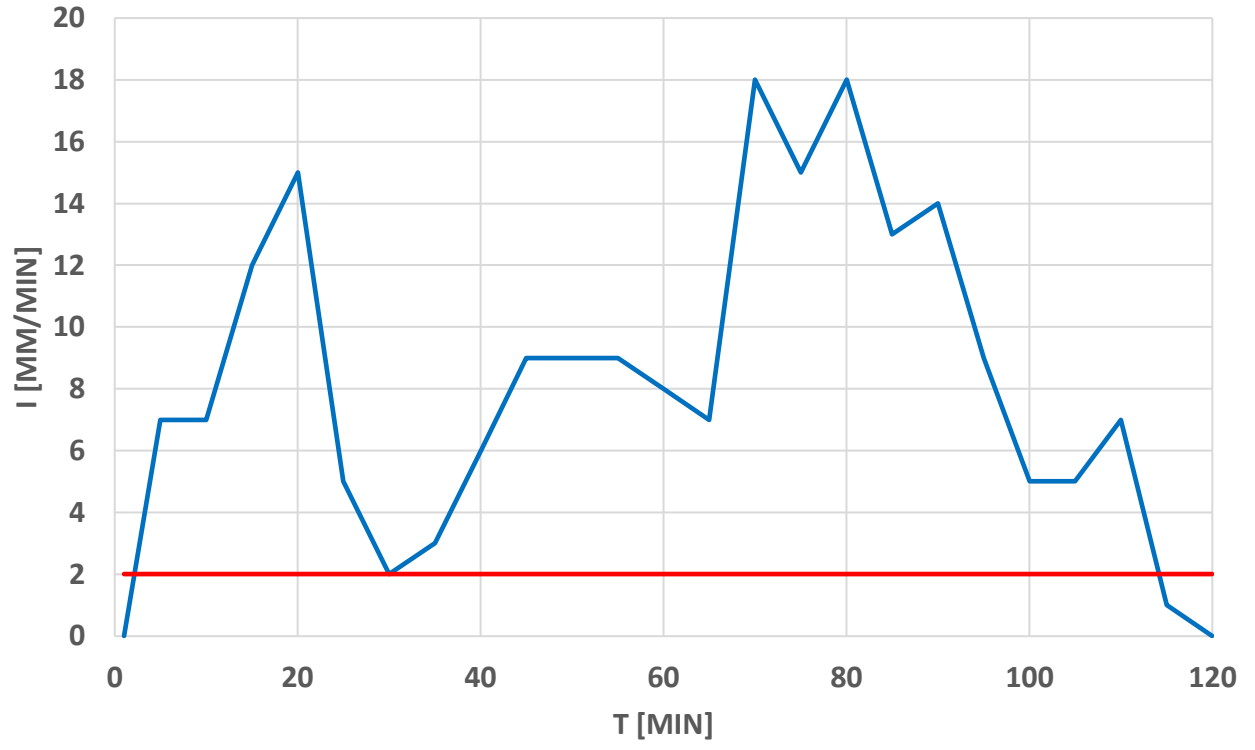
Esempio: CN (II) = 80 → CN (I) = 62, CN (III) = 90

$$CN(I) = \frac{4,2 * CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)}$$

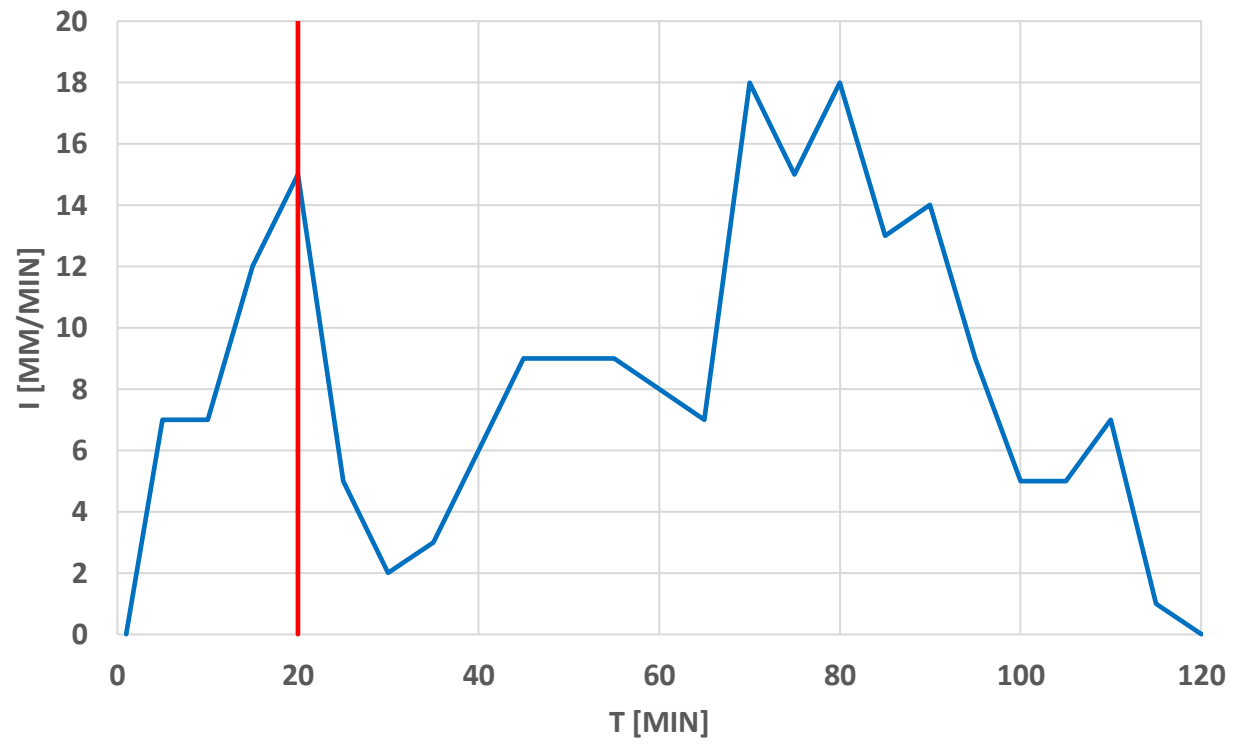
$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0.13 * CN(II)}$$



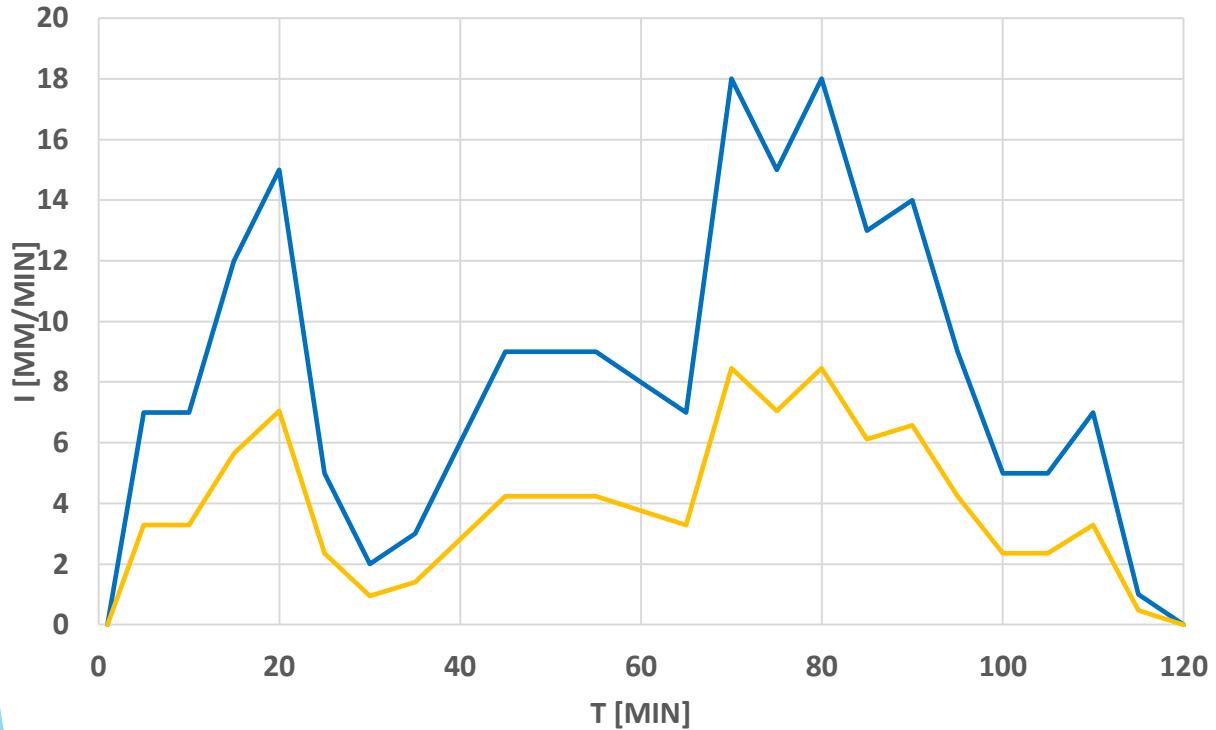
# ORIZZONTALE



# VERTICALE



# PERCENTUALE (per bacini urbani di piccole dimensioni)



$$\Phi = \varphi_{imp} * IMP + \varphi_{perm} * (1 - IMP)$$

$\Phi$  = coefficiente di afflusso

IMP = percentuale superficie impermeabilizzata

$\varphi_{imp}$  = coefficiente di afflusso sup.permeabile

$\varphi_{perm}$  = coefficiente di afflusso sup.impermeabile

T [anni]	$\varphi_{perm}$	$\varphi_{imp}$
<2	0.00 – 0.15	0.60 – 0.75
2-10	0.10 – 0.25	0.65 – 0.80
>10	0.15 – 0.30	0.70 – 0.90

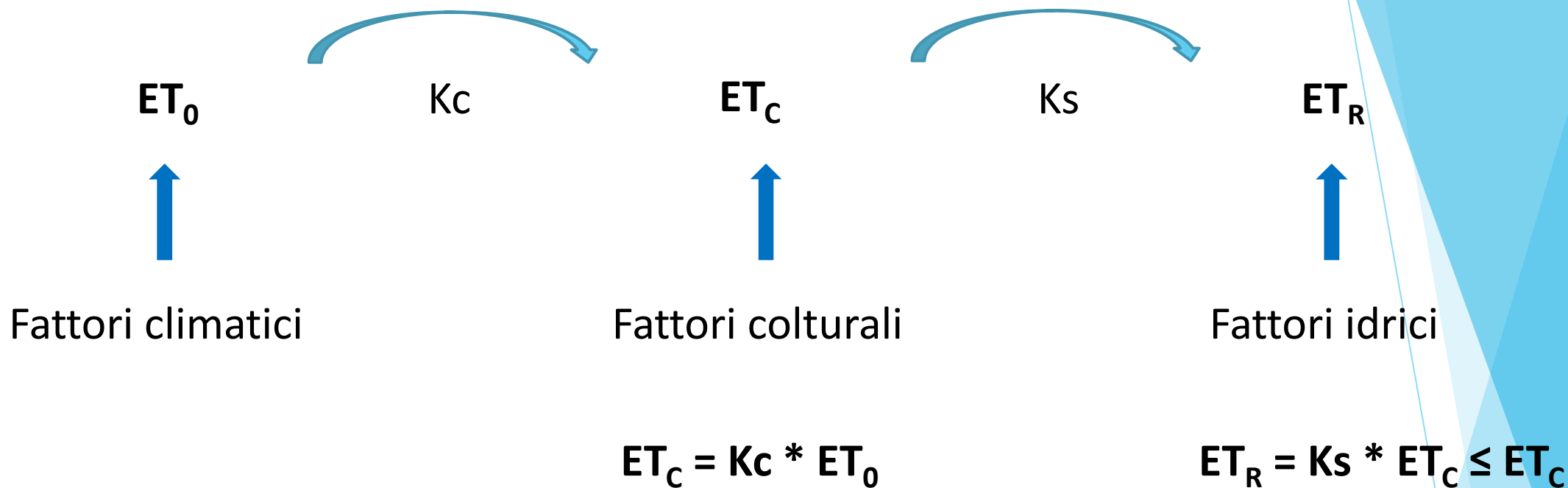
USO SUOLO	$\varphi$
Costruzioni dense	0.80
Costruzioni spaziate	0.60
Aree con cortili e grandi giardini	0.50
Zone a villini	0.30 – 0.40
Prati e parchi	0.00 – 0.25
Parchi e boschi	0.05 – 0.10

**$ET_0 = ET_p$  = evapotraspirazione di riferimento o potenziale:** evapotraspirazione di una coltura di riferimento, corrispondente ad una superficie estesa d'erba di altezza uniforme, nella fase di crescita, che nasconde completamente il terreno ed adeguatamente irrigata.

Necessario per definire oggettivamente il potere evaporativo dell'atmosfera, a prescindere dall'uso del suolo e dal tipo di coltura

**$ET_c$  = evapotraspirazione in condizioni standard:** quantità di acqua evapotraspirata nell'unità di tempo da una coltura uniforme e compatta che abbia piena disponibilità idrica, rappresenta il valore base per la stima dei fabbisogni idrici di tutte le colture agrarie

**$ET_a = ET_r$  = evapotraspirazione reale:** l'evapotraspirazione di una coltura in condizioni reali in funzione dello stress idrico cui è sottoposta



$K_c$  = coefficiente colturale, variabile durante la fase vegetativa

$K_s$  = coefficiente di stress idrico

# EQUAZIONE DI PENMAN-MONTEITH

1990 – FAO

2

$$ET_0 = \frac{0,408 * \Delta * (R - G) + \gamma * \left(\frac{900}{T_k}\right) * U_2 * (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34 * U_2)}$$

$ET_0$  = evapotraspirazione potenziale [mm/d]

$\Delta$  = pendenza della curva che esprime la tensione di vapore saturo in funzione della temperatura [kPa/°C]

$R$  = radiazione netta [MJ/(m<sup>2</sup>\*d)]

$T_k$  = temperatura assoluta media a 2m dal suolo [°K]

$U_2$  = velocità del vento a 2m dal suolo [m/s]

$G$  = flusso di calore dal suolo [MJ/(m<sup>2</sup>\*d)]

$e_a - e_d$  = deficit di pressione di vapore dell'aria [kPa]

$\gamma$  = costante psicrometrica [kPa/°C]

## FATTORI INFLUENTI

### Climatici:

- Precipitazioni
- Albedo
- Temperatura
- Resistenze aerodinamiche
- Turbolenze locali
- Vento
- Fenomeni advettivi

### Vegetazionali:

- Leaf area index
- Root system
- Capacità immagazzinamento

Periodo vegetativo  
Disponibilità idrica  
Tipologia suolo  
Disponibilità nutrienti

In genere l'evapotraspirazione cresce **↑** quando (a livello annuale):

- Precipitazione **↑**
- Temperatura **↑**
- Resistenze aerodinamiche **↓**
- Leaf area index **↑**
- Foreste > prati **↑**
- Estensione radici **↑**

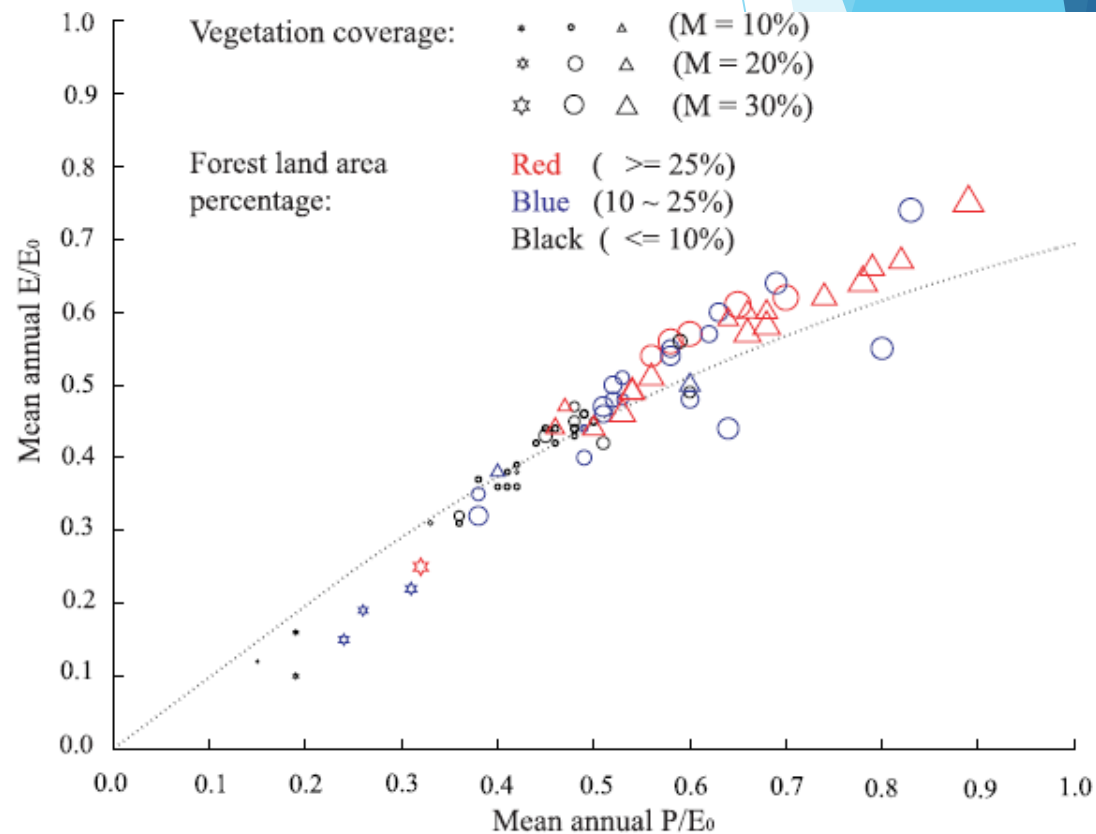
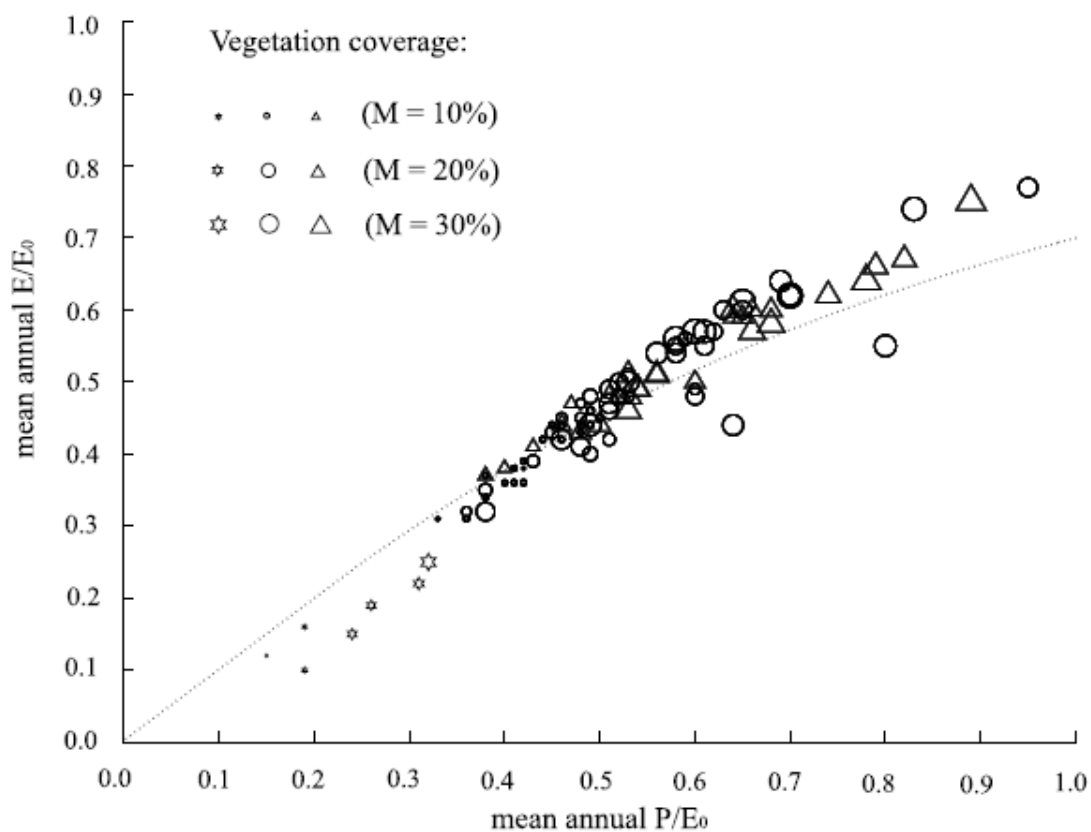
# CASI STUDIO

## 1) Impatto della vegetazione sul bilancio idrico

Cina: 3 grandi bacini (Giallo, Hai, Inland) e 99 sottobacini

Uso suolo: percentuale copertura della vegetazione

4 parametri: evapotraspirazione effettiva e potenziale, precipitazione, copertura della vegetazione



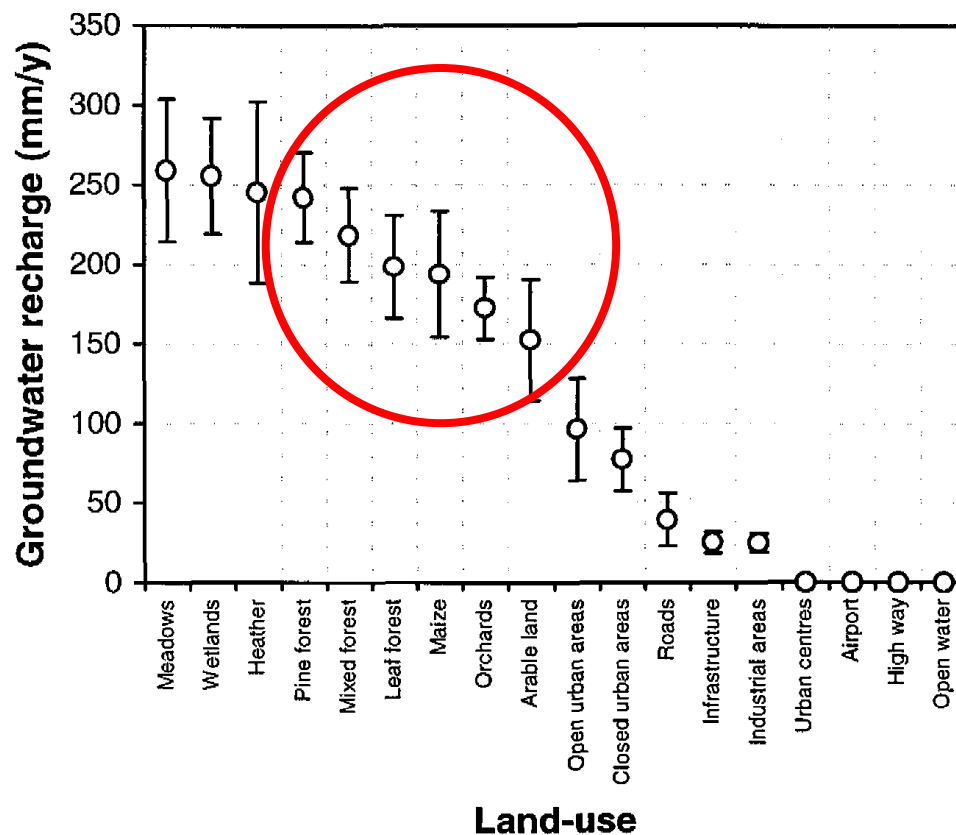
# CASI STUDIO

## 2) Impatto antropico su ricarica acquiferi

Belgio: bacino fiume Dijle, 691 km<sup>2</sup>,

Uso suolo: vario (infrastrutture, urbanizzato, aree industriali, foreste di conifere, foreste caducifoglie...)

Parametri: precipitazione, uso suolo, ricarica acquiferi





## TIPOLOGIA

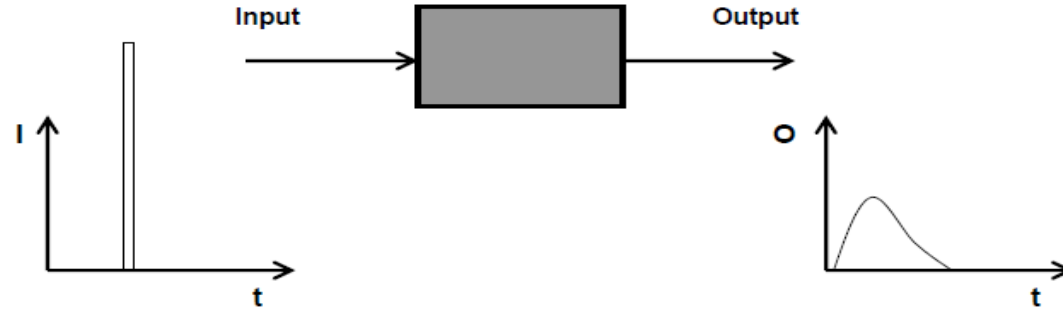
- 1) Scala temporale (singolo evento vs serie temporale continua)
- 2) Scala spaziale (globale vs distribuito)
- 3) Schema trasformazione (empirici vs concettuali vs fisicamente basati)

## MODELLI CONCETTUALI LINEARI E STAZIONARI (per bacini urbani di piccole dimensioni)

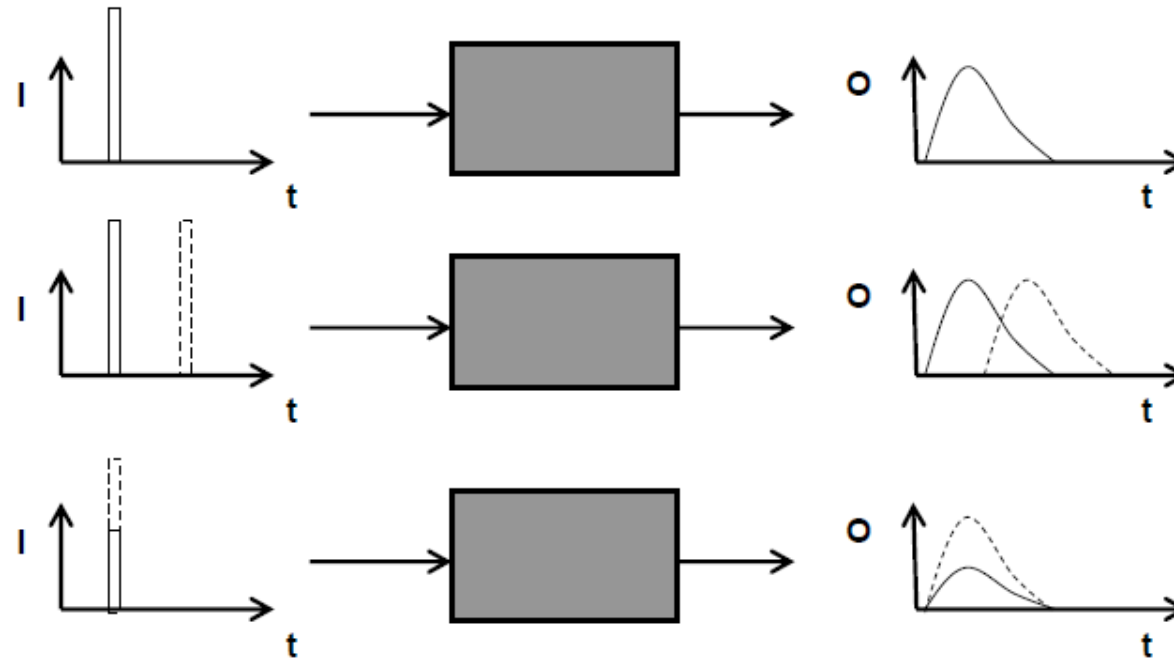
Ipotesi linearità → sovrapposizione degli effetti

Ipotesi stazionarietà → le caratteristiche idrologiche del bacino non variano nel tempo

IDROGRAMMA ISTANTANEO UNITARIO – IUH: rappresenta la risposta del bacino ad una precipitazione impulsiva di volume unitario e di intensità costante, è la funzione che permette di passare dalla precipitazione alla portata



Linearità e stazionarietà per l'IUH



L'onda di piena rappresentata dall'IUH ha una durata pari a  $T_0$  definito come tempo di base dell'IUH

L'IUH dipende dalle caratteristiche del bacino:

Bacini con  $T_0$  finito  $\rightarrow$  prevale il fenomeno dello scorrimento superficiale  $\rightarrow$  corrivazione

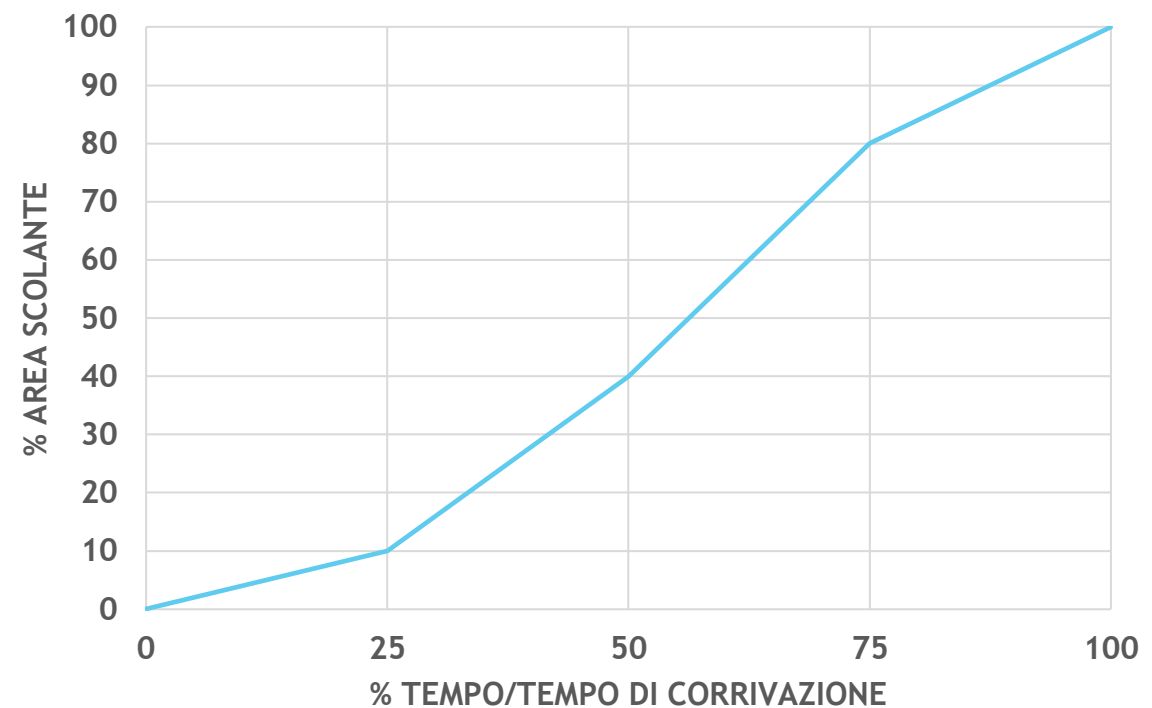
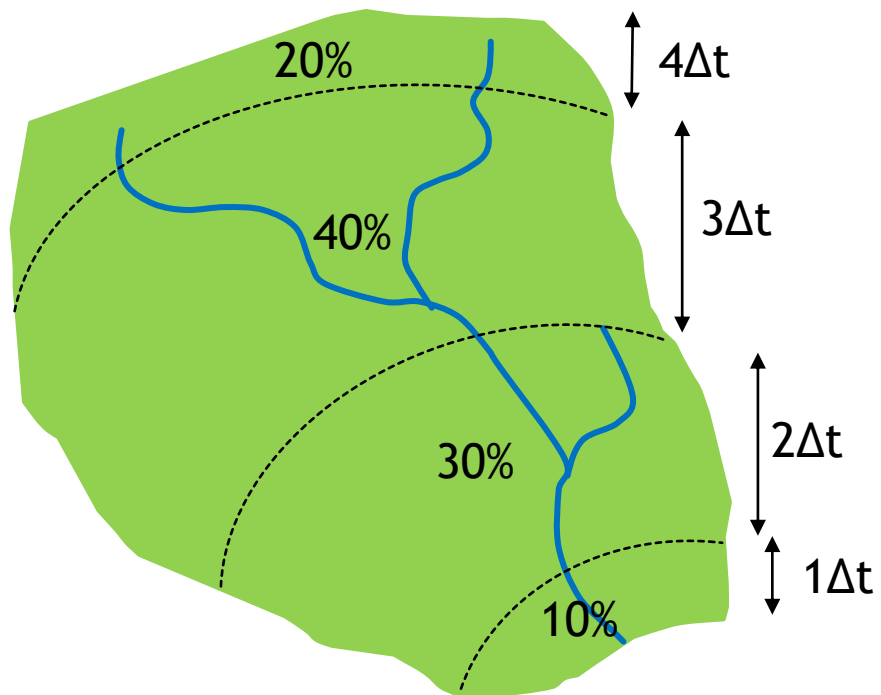
Bacini con  $T_0$  infinito  $\rightarrow$  prevale il fenomeno dell'accumulo  $\rightarrow$  invaso, nash

# CORRIVAZIONE

CURVA AREE-TEMPI: descrive la relazione tra area coperta dalla particella e tempo impiegato

$$IUH = \frac{1}{S_{TOT}} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$$IUH = 1/T_c \quad (\text{caso lineare})$$



**TEMPO DI CORRIVAZIONE:** tempo impiegato da una particella d'acqua caduta in un determinato punto per raggiungere la sezione di chiusura. Se il punto su cui cade è quello posto idraulicamente più lontano dalla sezione di chiusura, il tempo di corrivazione prende il nome di tempo di corrivazione del bacino ( $T_c$ )

MERZ

$$T_c = 2A^{0.35}$$

GIANDOTTI

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{1 + Hm}}$$

PASINI

$$T_c = 0.108 \frac{(AL)^{1/3}}{\sqrt{im}}$$

VENTURA

$$T_c = 0.1272 \sqrt{\frac{A}{im}}$$

SCS

$$T_c = 0.0027(1000L)^{0.8} \left[ \left( \frac{1000}{CN} \right) - 9 \right]^{0.7} ib^{-0.5}$$

VIPARELLI

$$T_c = \frac{L}{3.6V}$$

A=area [km<sup>2</sup>]

L=lunghezza asta principale [km]

im=pendenza media bacino

ib=pendenza media percentuale del bacino

Hm=altezza media del bacino [m]

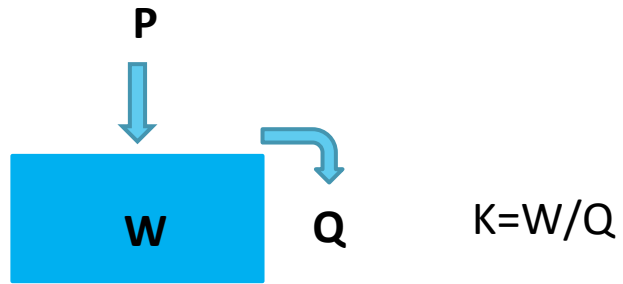
la=pendenza media dell'asta

V=velocità media di scorrimento

Durata idrogramma = durata pioggia +  $T_c$

# INVASO

Assimila il bacino ad un serbatoio lineare, la portata dipende linearmente dal volume invasato

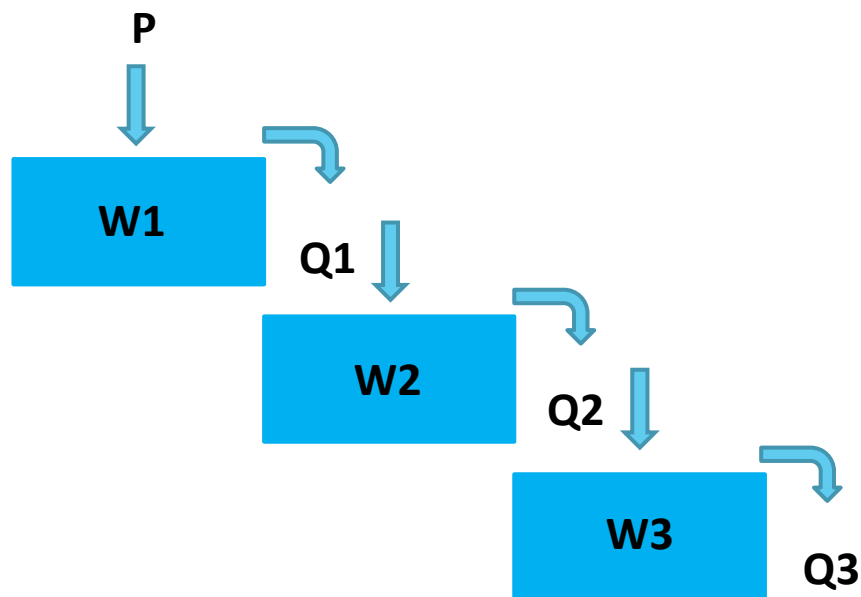


$K$ =costante di esaurimento [min]

$$IUH = (e^{\Delta t/K} - 1)/\Delta t * e^{-j*\Delta t/K}$$

## NASH

Simile al metodo dell'invaso ma considera più serbatoi in cascata



$$IUH = \frac{1}{k(n-1)!} \cdot \left(\frac{\Delta t}{k}\right)^{n-1} e^{-\frac{\Delta t}{k}}$$

$$K=0.7$$

$$n=3$$

Come per  $T_c$  esistono molte formule empiriche basate su pendenza, area, lunghezza dell'asta principale, area impermeabilizzata, durata, altezza e intensità della precipitazione, ma in genere si accettano come valori  $K=0.7$  e  $n=3$



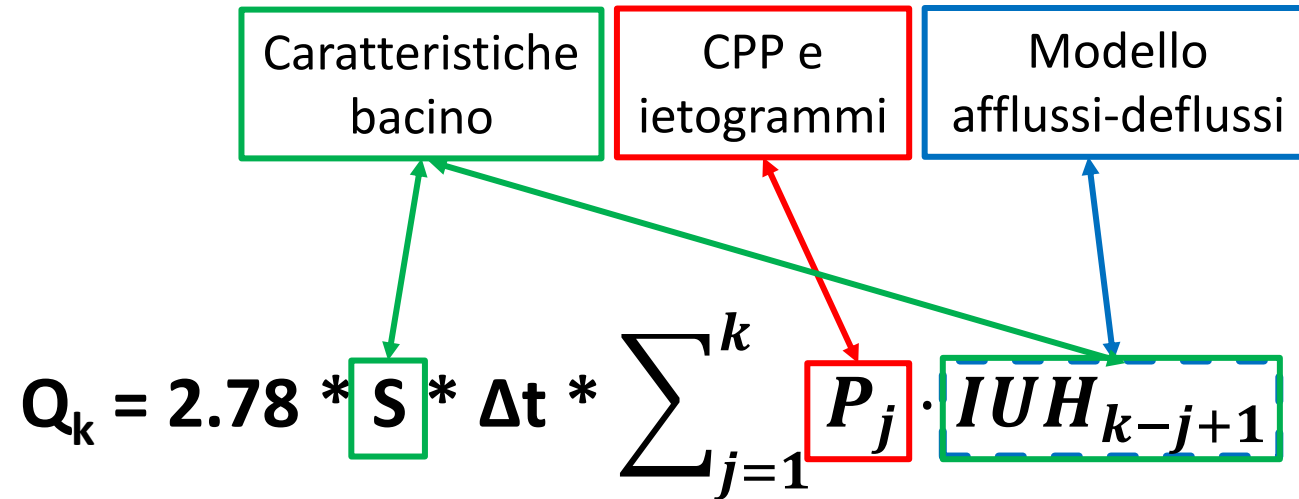
## CLARK

1945 - Il bacino si compone di una serie di canali lineari in parallelo e da un serbatoio lineare alla fine

Caso generale

$$IUH = \int_0^t e^{-\frac{t-\tau}{k}} \frac{1}{S} \frac{dA}{d\tau} d\tau$$

Come per il modello della corrivazione si può considerare anche una curva aree-tempi lineare



Q=portata [l/s]

S=superficie [ha]

$\Delta t$ =passo temporale [min]

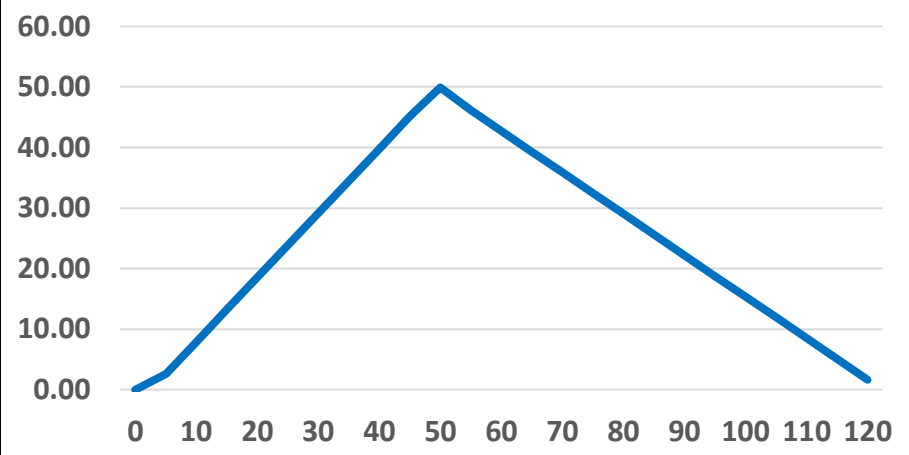
P=altezza di precipitazione [mm]

IUH=idrogramma istantaneo unitario

K=step calcolo portata

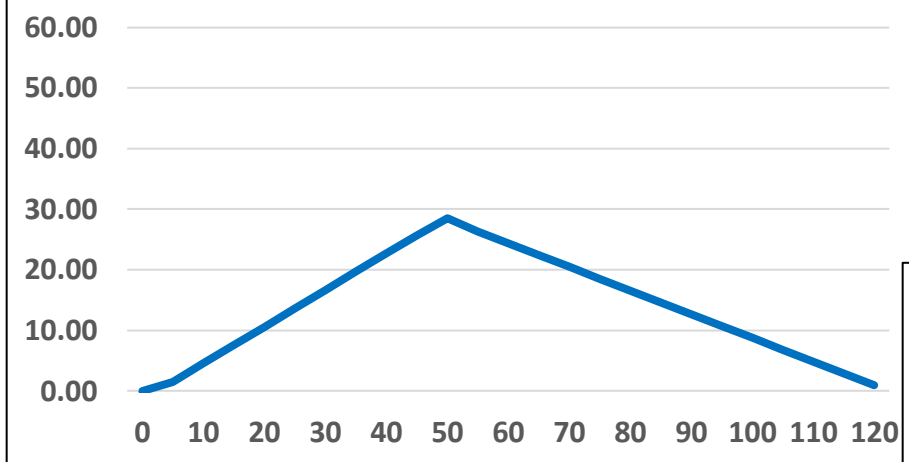
J=step calcolo

### IETOGRAMMA LORDO



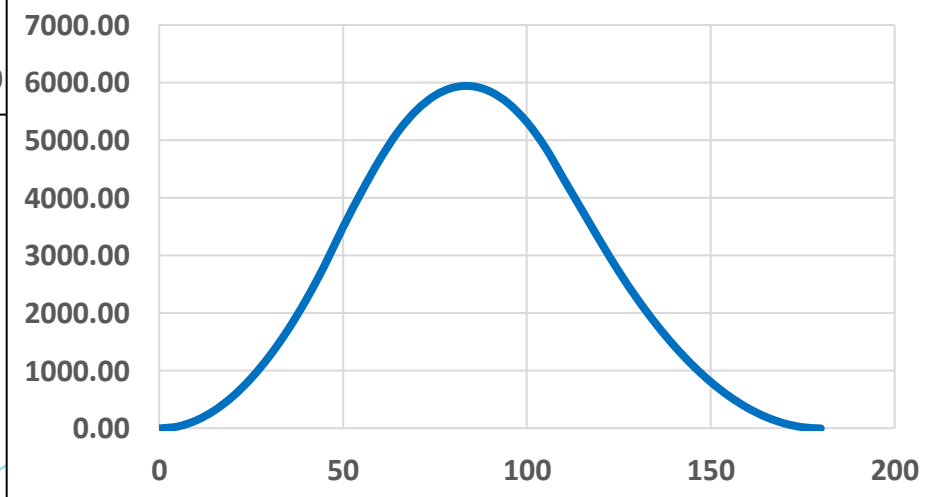
$\Phi \approx 50-60\%$

### IETOGRAMMA NETTO

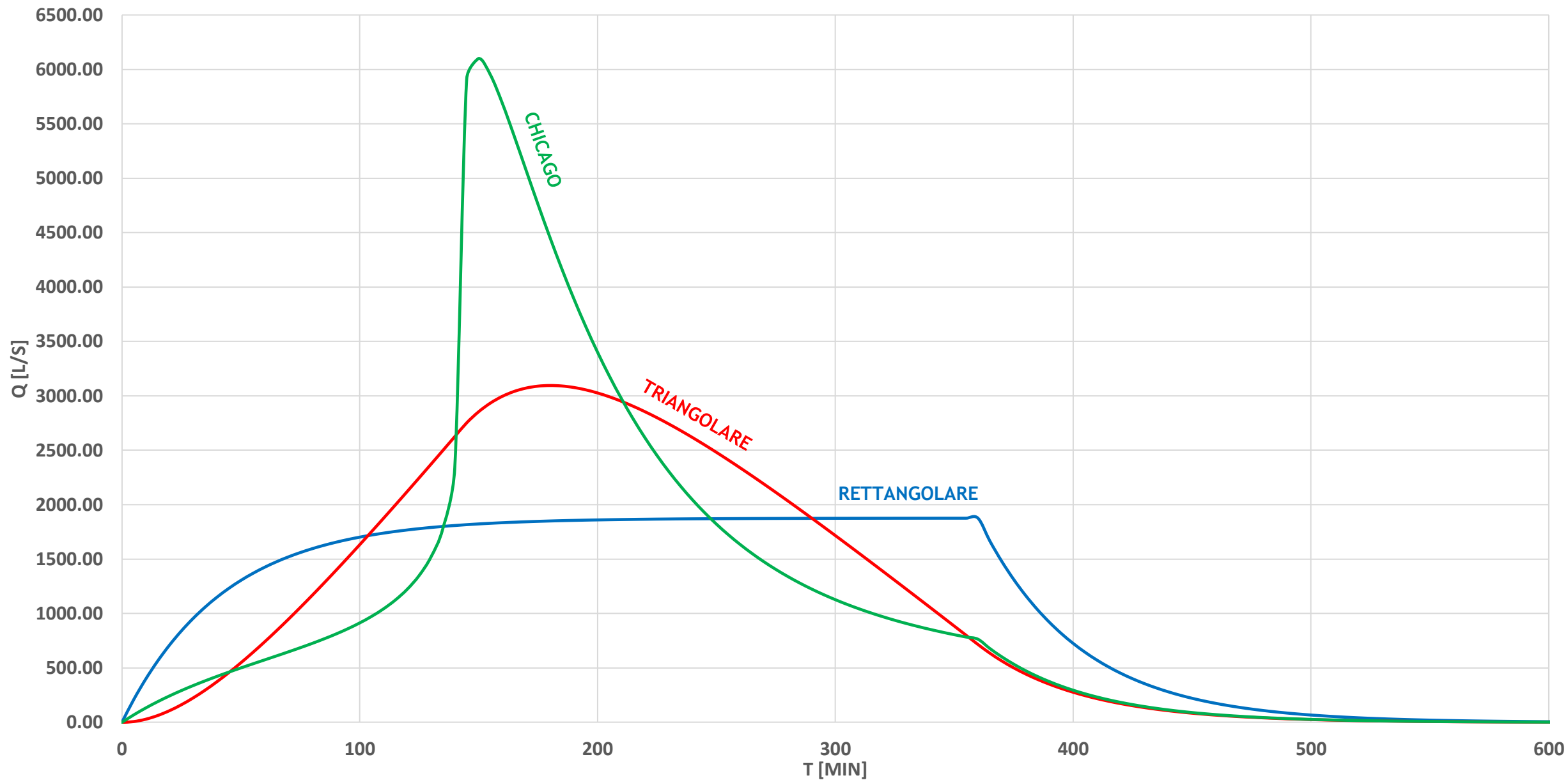


MODELLO CORRIVAZIONE  
Tc=60 minuti

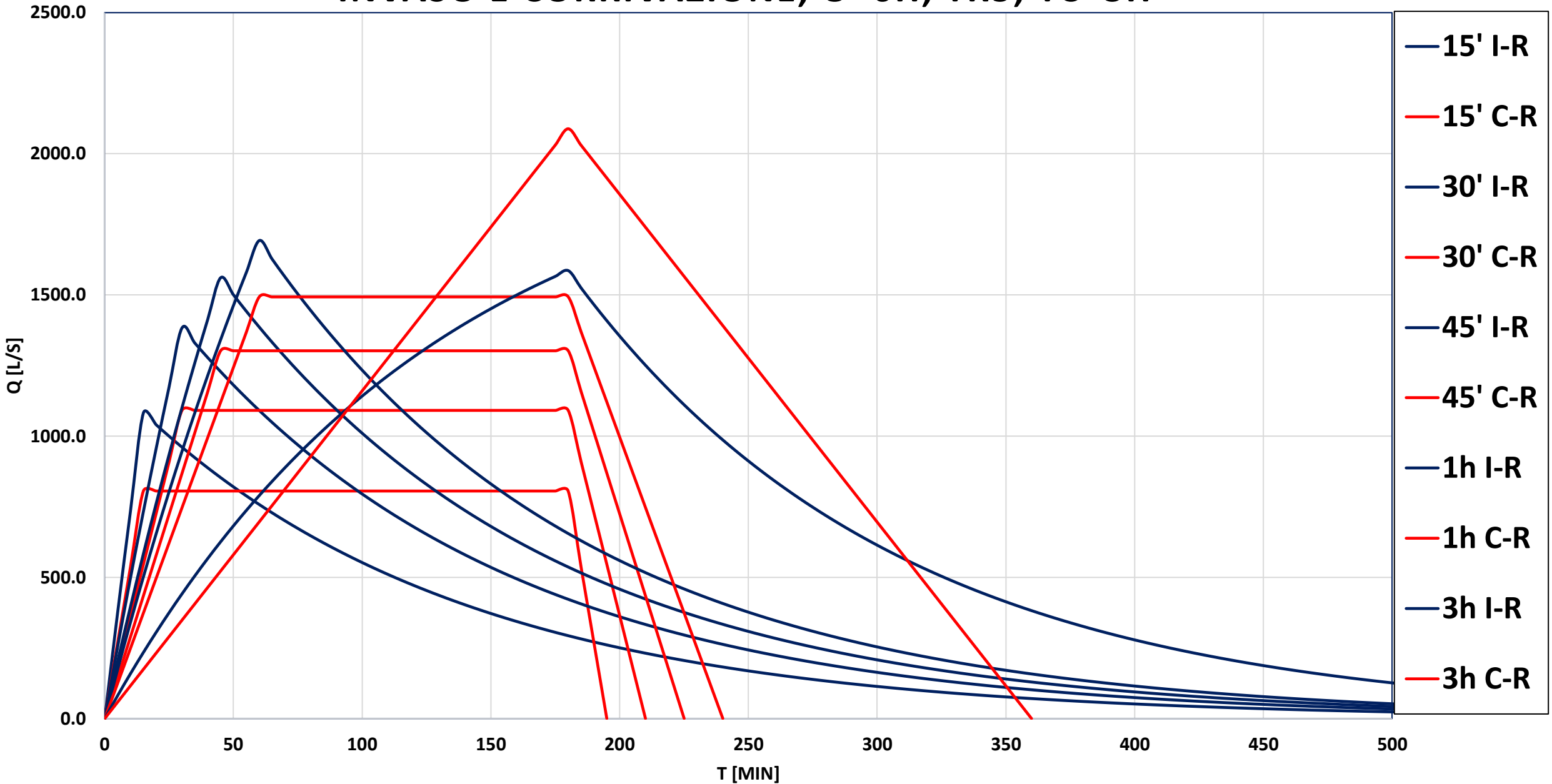
### IDROGRAMMA



# IDROGRAMMI MODELLO INVASO - $\theta=6h$ , TR5



# IDROGRAMMI CON IETOGRAMMA RETTANGOLARE – MODELLI INVASO E CORRIVAZIONE, $\theta=6H$ , $TR5$ , $TC=3H$



## METODO SOLE PIOGGE

Considera trascurabile l'effetto del bacino nella trasformazione afflussi-deflussi

$$Q_e = S * \varphi * \underbrace{(a * \Theta^n)}_{h \text{ da CPP}} / \Theta$$

h da CPP

h da CPP

$$W_e = Q_e * \Theta = S * \varphi * (a * \Theta^n)$$

$$W_u = Q_u * \Theta = S * u_{lim} * \Theta$$

$$\Delta W = W_e - W_u$$

$Q_e$  = portata entrante nell'invaso [l/s]

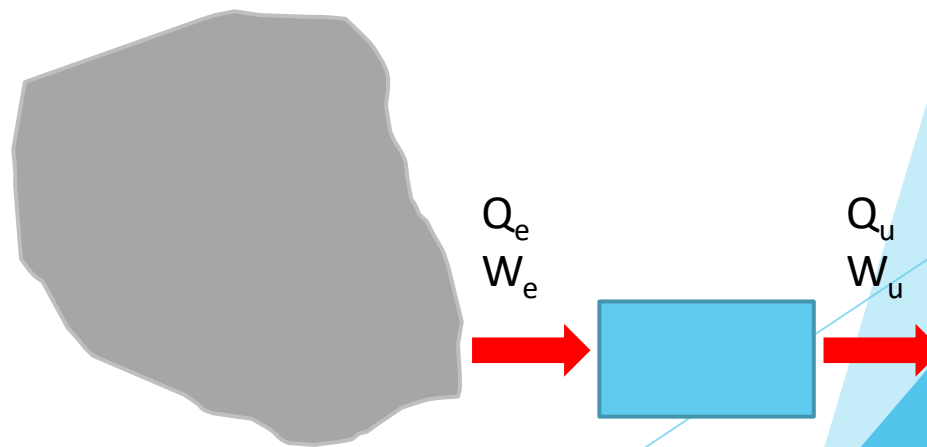
$W_e$  = volume entrante nell'invaso [l]

$Q_u$  = portata uscente dall'invaso [l/s]

$W_u$  = volume uscente dall'invaso [l]

$\Delta W$  = volume trattenuto dall'invaso [l]

$u_{lim}$  = portata massima ammissibile scaricata [l/s/haimp]



# REFERENCES

Becciu G. & Paoletti A., *FONDAMENTI DI COSTRUZIONI IDRAULICHE*, UTET Scienze Tecniche, 2010

EPA STORMWATER MANAGEMENT MODEL APPLICATIONS MANUAL

1) Dawen Yang, Weiwei Shao, Pat J.-F. Yeh, Hanbo Yang, Shinjiro Kanae and Taikan Oki; *Impact of vegetation coverage on regional water balance in the nonhumid regions of China*; WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 45, W00A14, doi:10.1029/2008WR006948, 2009

2) Alice E. Brown<sup>a</sup>, Lu Zhang<sup>b</sup>, Thomas A. McMahon<sup>c</sup>, Andrew W. Western<sup>c</sup>, Robert A. Vertessy; *A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation*; Journal of Hydrology 310 (2005) 28–61

[www.idro.arpalombardia.it](http://www.idro.arpalombardia.it)

Regolamento regionale 23 novembre 2017 n.7, “Regolamento recante criteri e metodi per il rispetto del principio dell’invarianza idraulica ed idrologica ai sensi dell’articolo 58 bis della legge regionale 11 marzo 2005, n. 12 (Legge per il governo del territorio)”

<https://www.regione.lombardia.it>



# GRAZIE