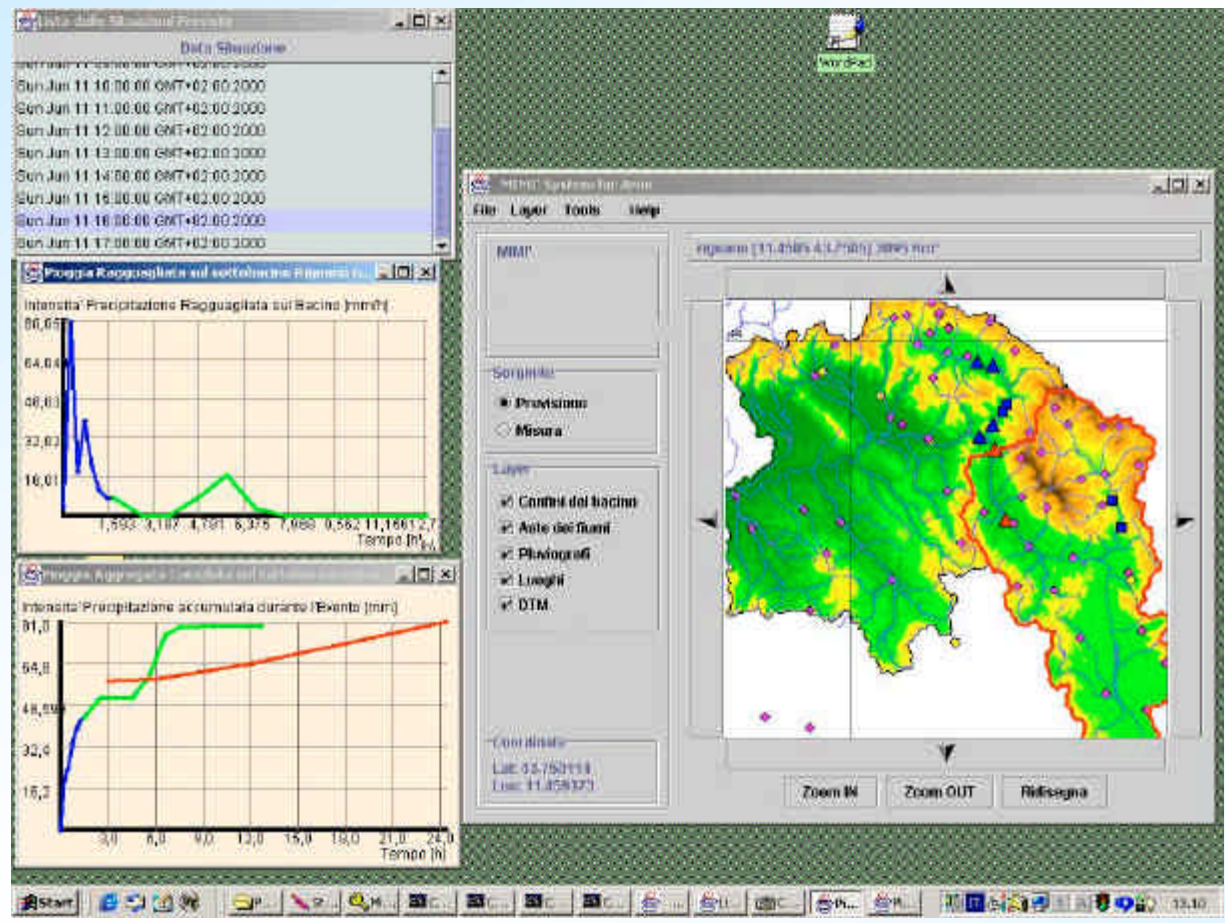


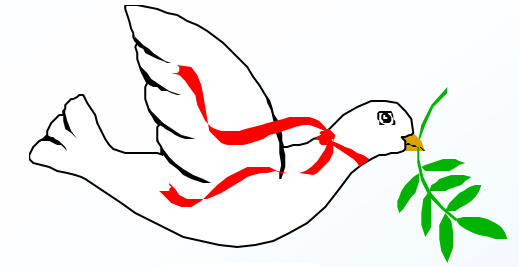


slide 1

# Il servizio di piena monitoraggio, preavviso e preannuncio dei fenomeni alluvionali 4. Precursori di piena e metodi di preavviso



R. Rosso - Il Servizio di Piena (4)



**Renzo Rosso, DIAR,  
Politecnico di Milano**



# Architettura del Sistema

slide 2

R. Rosso - Il Servizio di Piena (4)

**Monitoraggio**

Rete di  
monitoraggio  
al suolo

Radar  
meteorologico

Sensori  
satellitari

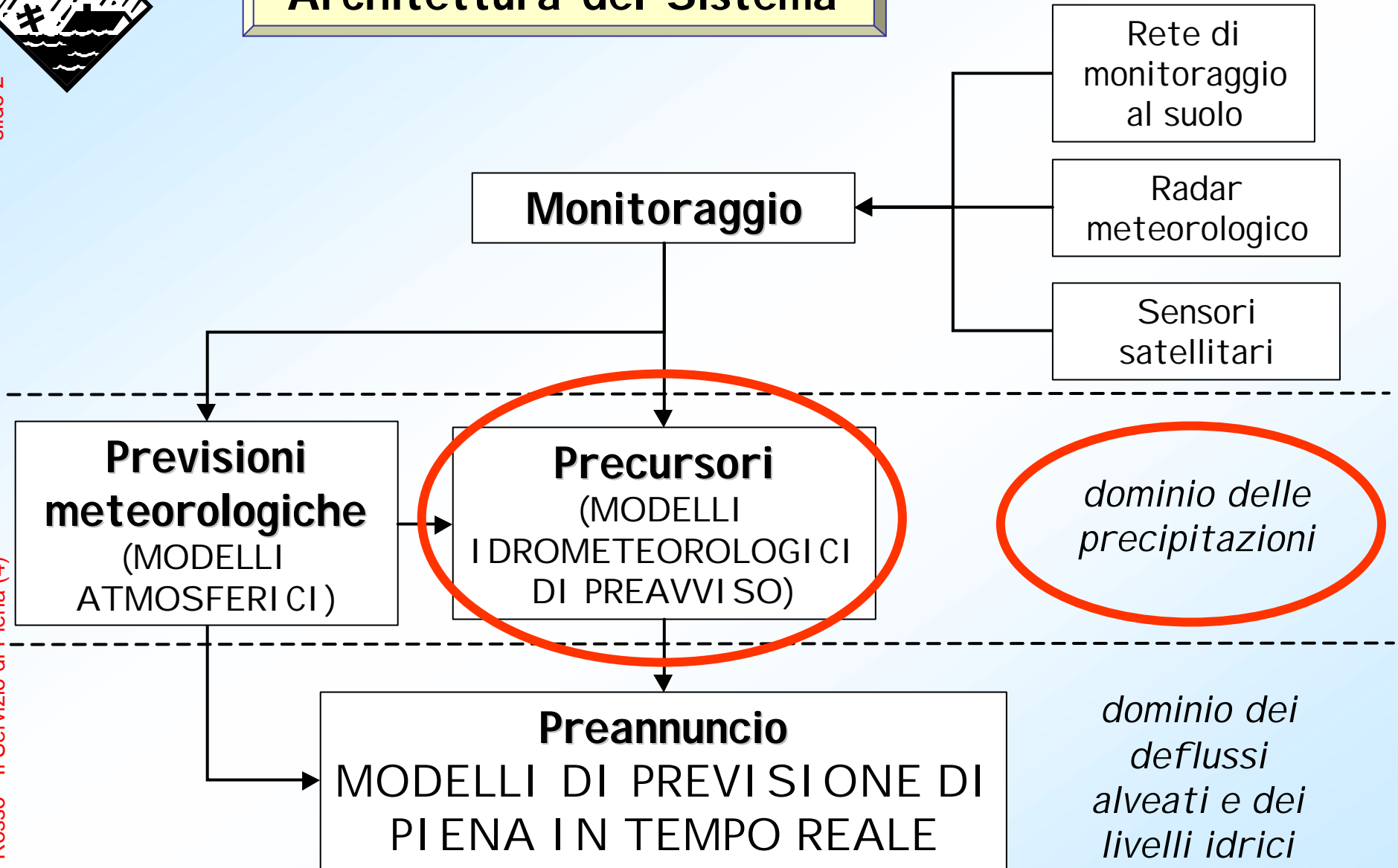
**Previsioni  
meteorologiche**  
(MODELLI  
ATMOSFERICI)

**Precursori**  
(MODELLI  
IDROMETEOROLOGICI  
DI PREAVVISO)

*dominio delle  
precipitazioni*

**Preannuncio**  
MODELLI DI PREVISIONE DI  
PIENA IN TEMPO REALE

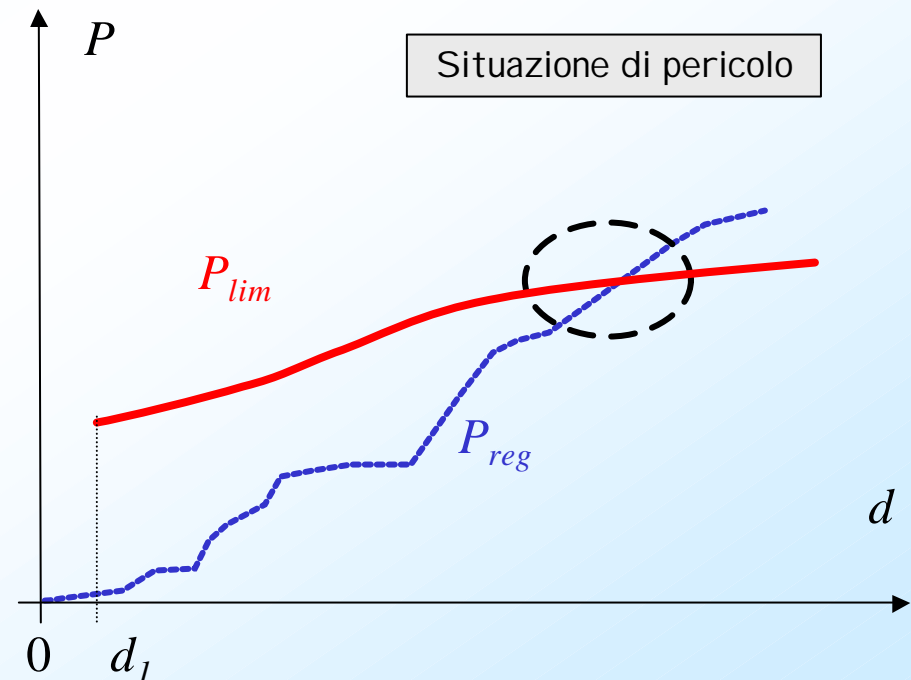
*dominio dei  
deflussi  
alveati e dei  
livelli idrici*





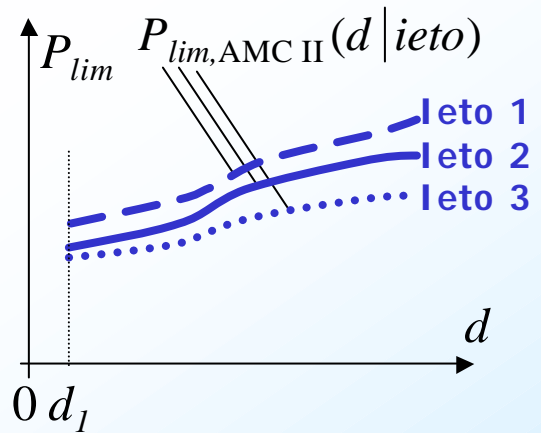
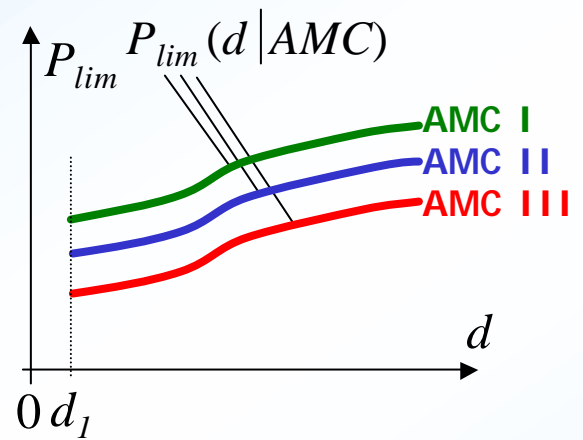
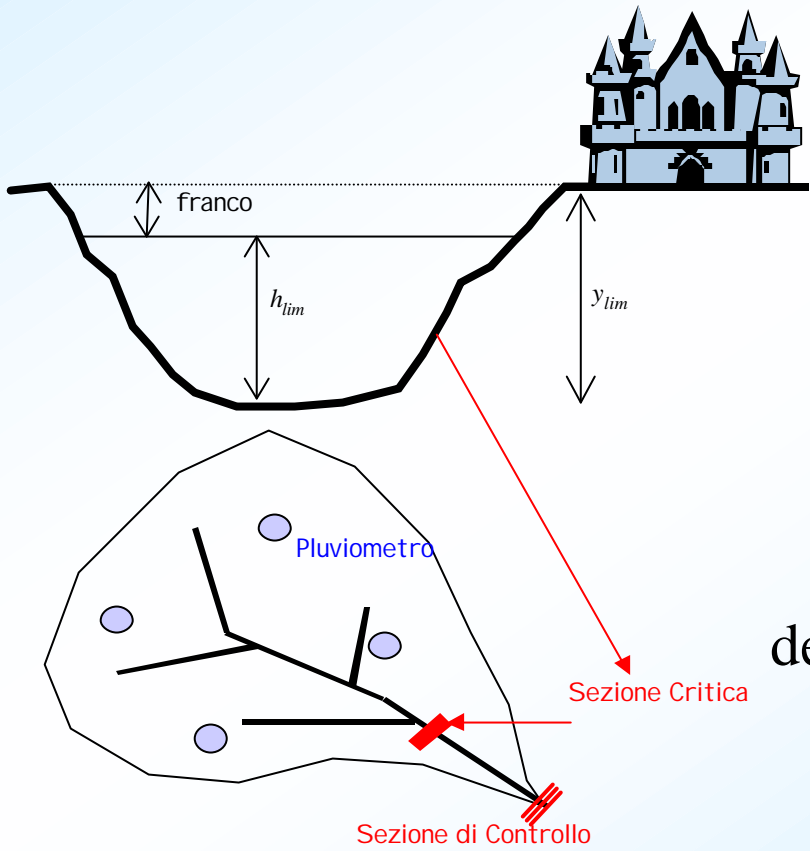
## Soglie pluviali di preavviso di piena

Per la sezione “critica” in esame si deve ricercare il luogo dei punti sul piano  $(P, d)$  che possono produrre una situazione limite di criticità, ossia possono provocare il raggiungimento di un valore critico di portata al colmo (esondazione o guardia). Questo luogo di punti o *insieme limite* può dare origine a una curva di pioggia cumulata che esprime il volume di precipitazione massimo senza che vi sia, p.es., rischio di esondazione (evento  $E_c$ ), e il volume di precipitazione minimo registrabile affinché vi sia rischio di esondazione (evento  $E$ ), per ogni durata  $d$ .





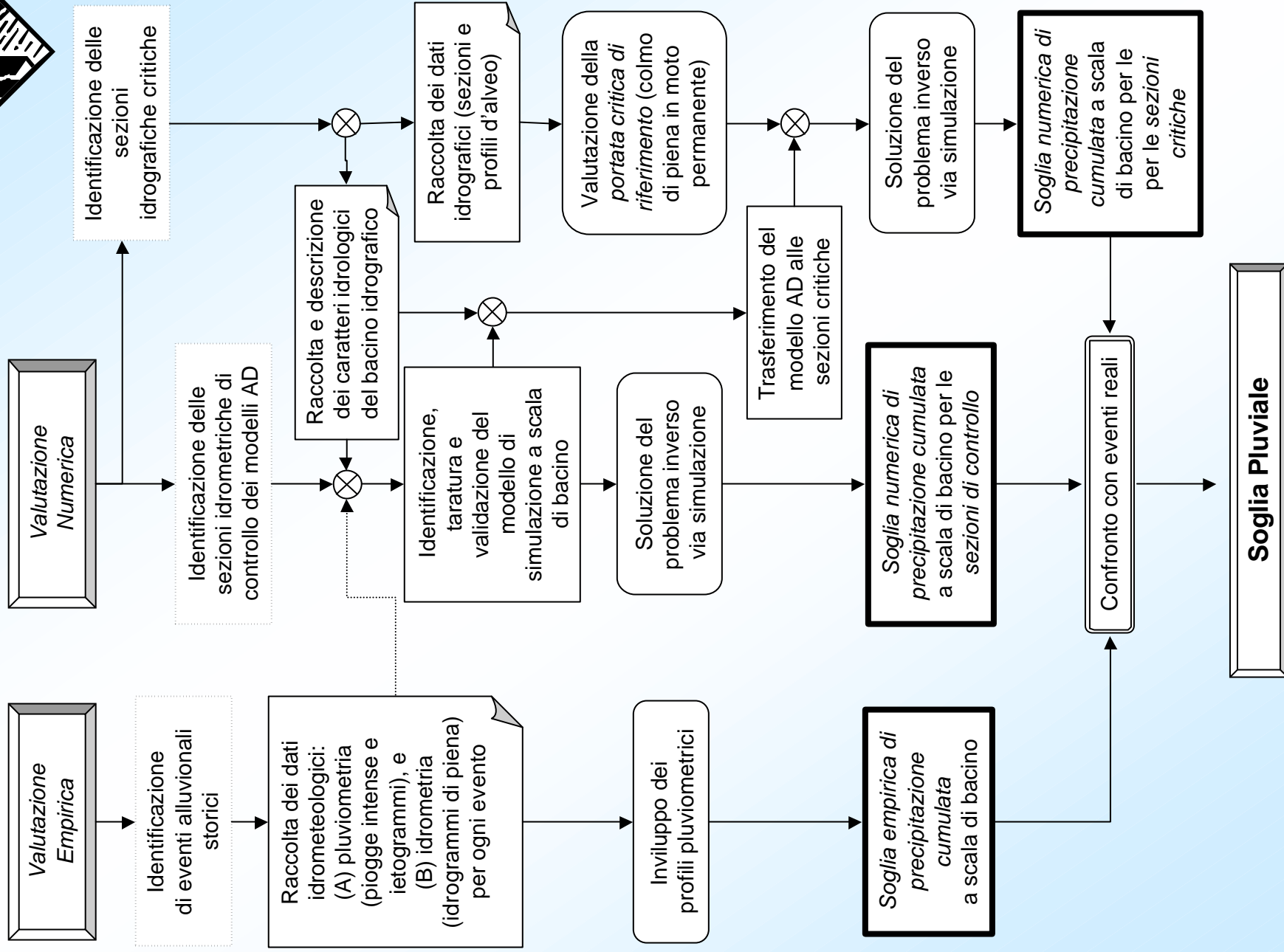
Schema per la definizione delle soglie di preavviso, dove si considera l'eventuale franco necessario a rappresentare le incertezze di tipo idraulico

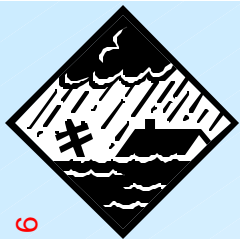


Soglia pluviuale in funzione (*sopra*) dello stato iniziale di imbibimento del bacino sotteso dalla sezione critica, rappresentato dall'indice *AMC*, e (*sotto*) del tipo di ietogramma

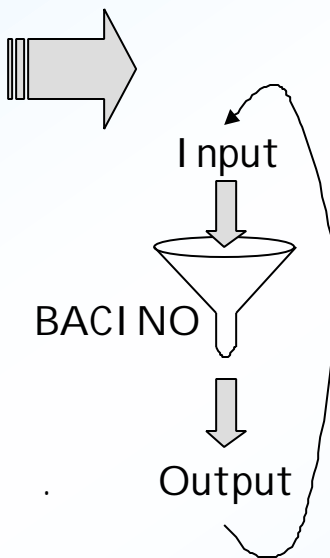
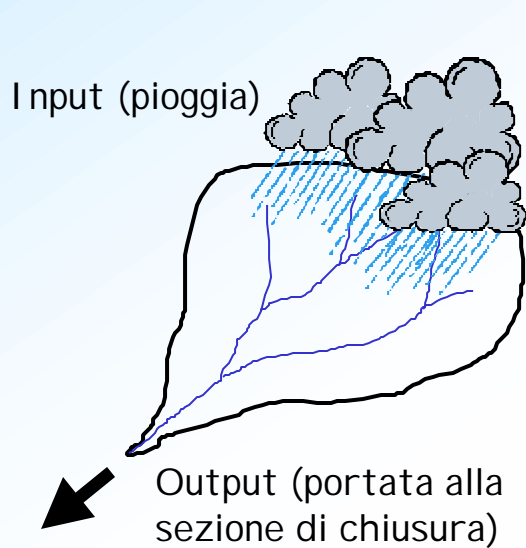


## procedure per la valutazione delle soglie pluviali

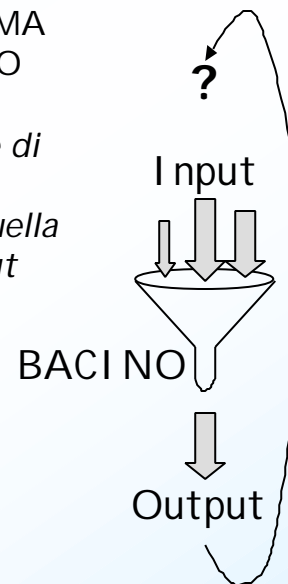




# problema inverso



PROBLEMA DIRETTO  
*nota la funzione di Input si ricava quella di Output*



PROBLEMA INVERSO  
*nota la funzione di Output si ricercano quelle di Input*

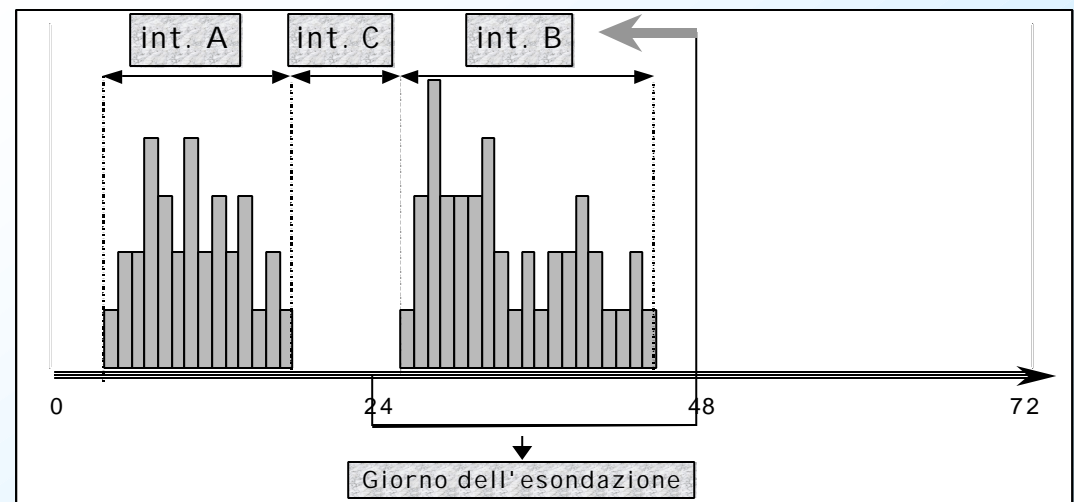


## soglie empiriche

### 4 fasi

- (i) definizione delle data in cui sono censite le esondazioni in una data località, p.es., tramite *MAPPAVI* (CNR GNDICI, 1998);
- (ii) identificazione, dei pluviometri funzionanti più significativi per il sottobacino alla data dell'evento di esondazione;
- (iii) grado dell'indice di umidità del suolo precedente l'evento meteorico tramite il valore (in mm) di Antecedent Moisture Condition, AMC (*USDA*, 1994) in base alle piogge cumulate dei 5 giorni precedenti; e
- (iv) calcolo delle altezze di precipitazione per le diverse durate.

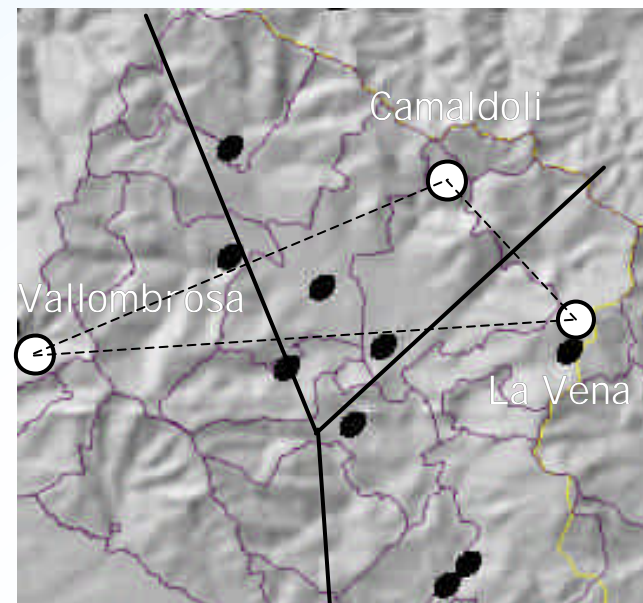
Esempio di possibile  
ietogramma critico





## Località colpite da esondazioni) con i confini dei comuni del territorio del Casentino (da MAPPAVI, CNR-GNCIDI, 1998)

### Stazioni pluviografiche disponibili e relative aree di influenza



Scheda tecnica relativa all'evento del 4 Novembre 1966 (Censimento AVI).

Data	4 Novembre 1966
Fiumi esondati	F. Arno, T. Chiassa, T. Archiano, T. Corsalone, T. Salutio, T. Roille, T. Rioesine, T. Sova, T. Rassina, T. Solano, T. Teggina
Località colpite	Subbiano, Capolona, Giovi, Bibbiena, Castelfocognano, Poppi, Chiusi della Verna, Castel S.Niccolò, Ortignano Raggiolo, Stia
Distribuzione spaziale delle località colpite	Vedi Figura 1

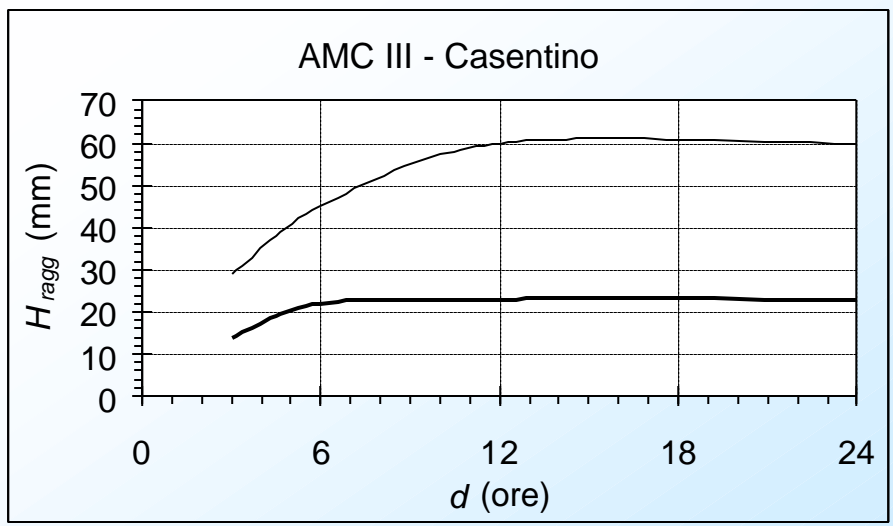
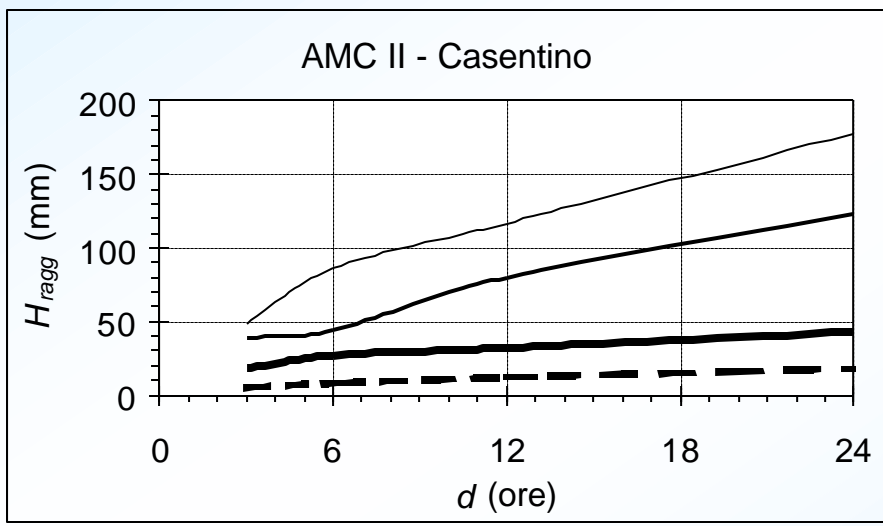
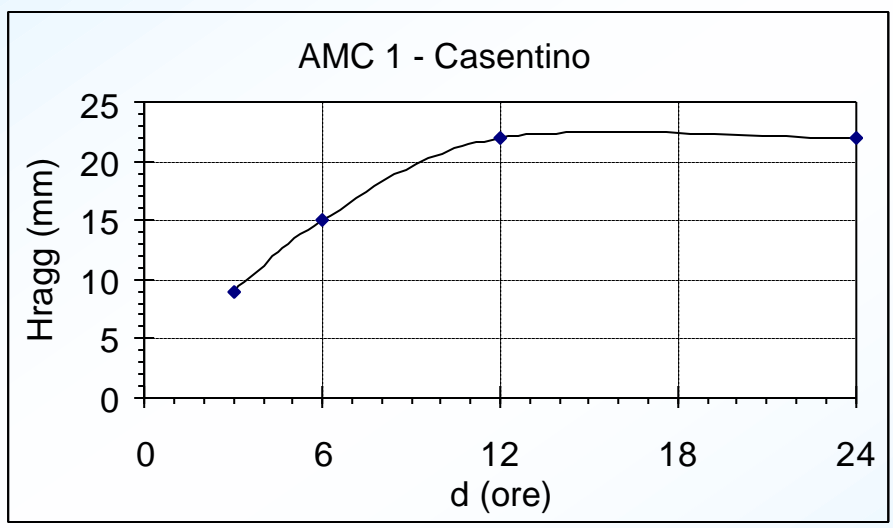
	Danni per un miliardo nel Casentino. Danni gravi ad infrastrutture a rete, edifici civili ed industriali. Danni gravi alla viabilità stradale (la Casentinese) ed alto Casentino isolato.
Danni	<p>Subbiano L'esondazione del torrente Chiassa nei comuni di Subbiano ed Arezzo ha interessato 210 ha. Quella dell'Arno 15870 ha.</p> <p>Bibbiena Danni per 177 milioni di lire; colpite case sparse, industrie chimiche, ed opere di regimazione fluviale.</p> <p>Capolona Danni gravi ad edifici civili ed alle industrie chimiche ed estrattive della zona.</p> <p>Castel-focognano Due dispersi. In località Salutio è crollato un ponte sul torrente omonimo. In località Rassina allagate imprese di escavazione.</p> <p>Poppi Una rotta dell'Arno è avvenuta in località Croce di Menennano. Danni gravi a centri abitati, ponti, viadotti, acquedotti, condotta forzata....</p> <p>Chiusi della Verna Danno totale alle opere di regimazione.</p> <p>Castel S.Niccolò Ostruzione del torrente Solano dovuta ad una frana.</p>





Bacino del Casentino: eventi raggruppati per assegnata durata e condizione di umidità del terreno (AMC) e relativa altezza di pioggia in mm.

Data	Tipo AMC	Durate			
		3	6	12	24
03/11/80	I	9	15	22	22
04/11/66	II	49	86	117	178
01/12/66	II	5	8	12	18
31/10/76	II	18	27	32	43
30-31/10/1992	II	39	44	80	123
06/11/80	III	14	22	23	23
20/10/92	III	29	45	60	64



Soglie pluviali empiriche relative al bacino del Casentino al variare dell'indice AMC (1° caso critico: linea sottile, 2°: linea media; 3°: linea spessa; 4°: linea tratteggiata)



Analisi dei superamenti per la curva soglia (3° caso critico, AMC Tipo II).  
Il numero dei falsi preavvisi e dei mancati preavvisi è in %, rispettivamente, del totale dei preavvisi e del numero di esondazioni registrate

AMC Tipo II	Orizzonte/Durata (ore)			
	3	6	12	24
Totale preavvisi	86	67	96	88
Falsi preavvisi	82	63	92	83
Preavvisi corretti	4	4	4	5
% Falsi preavvisi	95%	94%	96%	94%
% Mancati preavvisi	43%	43%	43%	29%
<i>Eventi</i>				
<b>04/11/66</b>	X	X	X	X
01/12/66	O	O	O	O
31/10/76	X	X	X	X
<b>03/11/80</b>	O	O	O	X
<b>06//11/80</b>	X	X	X	X
<b>30//10/92</b>	X	X	X	X

**X**: preavviso corretto

**O**: mancato preavviso

**gg/mm/aa**: evento con gravi danni

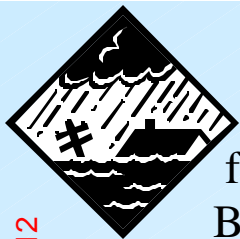
- (a) *preavviso corretto*, evento con superamento della soglia considerata per il quale si sono verificate effettivamente esondazioni nel tronco in esame;
- (b) *falso preavviso*, evento per il quale al superamento del valore di soglia non hanno corrisposto esondazioni;
- (c) *mancato preavviso*, evento per il quale sono state segnalate esondazioni, ma per il quale la soglia non viene superata



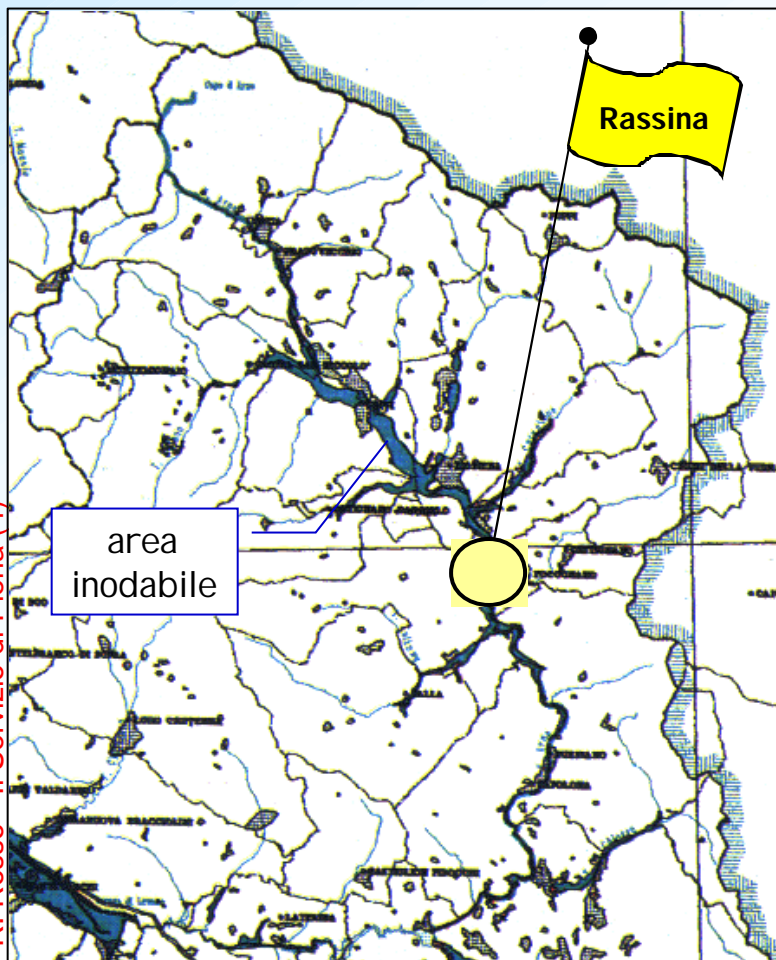
Frequenze di fallanza per le soglie empiriche del Casentino:  
 il numero dei falsi preavvisi e dei mancati preavvisi è espresso in %  
 rispettivamente del totale dei preavvisi e del numero di esondazioni registrate

	Orizzonte/Durata (ore)			
	3	6	12	24
<b>AMC Tipo I, 1° Caso Critico</b>				
% Mancati preavvisi	14%	29%	29%	29%
% Falsi preavvisi	98%	98%	98%	98%
<b>AMC Tipo II, 1° Caso Critico</b>				
% Mancati preavvisi	86%	86%	86%	86%
% Falsi preavvisi	75%	0%	0%	0%
<b>AMC Tipo II, 2° Caso Critico</b>				
% Mancati preavvisi	71%	57%	71%	71%
% Falsi preavvisi	67%	73%	60%	0%
<b>AMC Tipo II, 3° Caso Critico</b>				
% Mancati preavvisi	43%	43%	43%	29%
% Falsi preavvisi	95%	94%	96%	94%
<b>AMC Tipo II, 4° Caso Critico</b>				
% Mancati preavvisi	0%	0%	0%	0%
% Falsi preavvisi	99%	99%	99%	99%
<b>AMC Tipo III, 1° Caso Critico</b>				
% Mancati preavvisi	57%	71%	57%	57%
% Falsi preavvisi	79%	80%	75%	87%
<b>AMC Tipo III, 2° Caso Critico</b>				
% Mancati preavvisi	43%	43%	43%	29%
% Falsi preavvisi	97%	97%	98%	99%

- (a) *preavviso corretto*, evento con superamento della soglia considerata per il quale si sono verificate effettivamente esondazioni nel tronco in esame;
- (b) *falso preavviso*, evento per il quale al superamento del valore di soglia non hanno corrisposto esondazioni;
- (c) *mancato preavviso*, evento per il quale sono state segnalate esondazioni, ma per il quale la soglia non viene superata



Carta delle aree inondabili :  
particolare relativo al tratto di  
fiume del Casentino (Autorità di  
Bacino del Fiume Arno, Piano di  
Bacino del Fiume Arno, Rischio  
Idraulico)



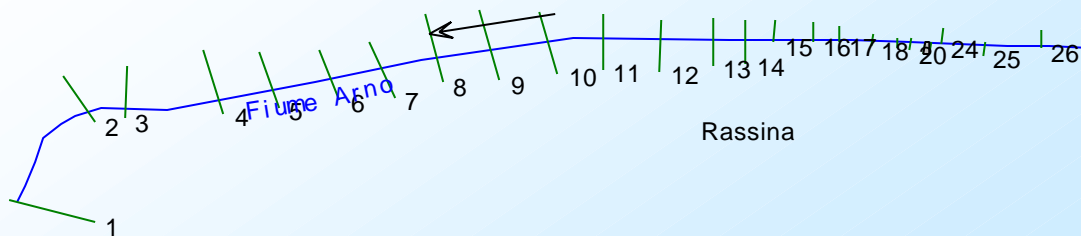
## criticità idraulica

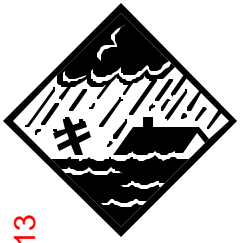
portata di esondazione

portata di **guardia**

*franco*

schematizzazione del tratto di Rassina, con  
indicata la localizzazione delle sezioni  
geometriche rilevate



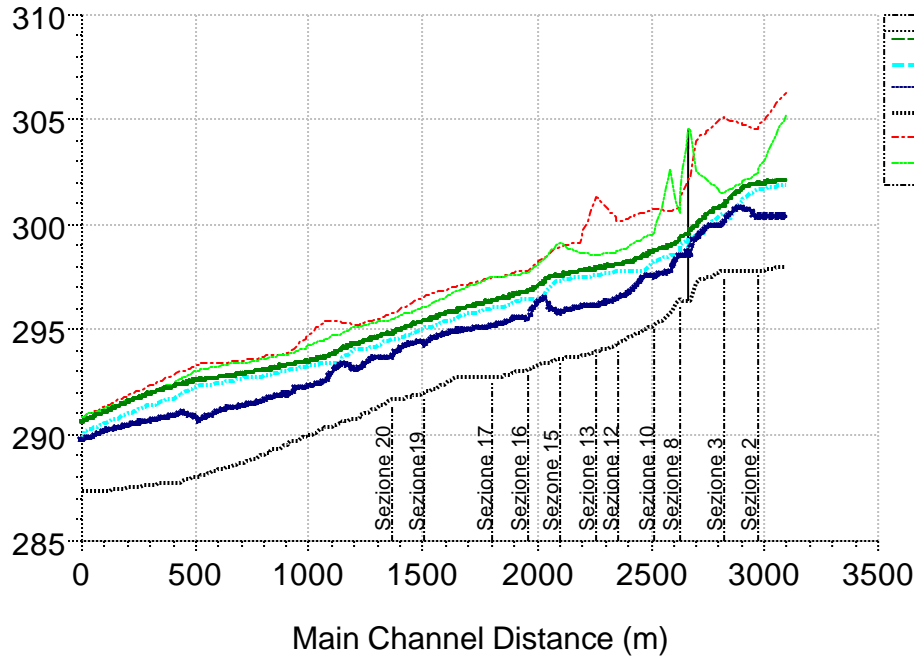


Sezione di calcolo della criticità idraulica nel tronco di Rassina (codice HEC)

Profilo idraulico del Fiume Arno nel tronco di Rassina, calcolato in condizioni di moto permanente, per la portata di 495 m<sup>3</sup>/s

Fiume Arno a Rassina

Geom: Sezioni rilievo ing. Chiarini ('94) Flow: Portata di franco a valle di Rassina

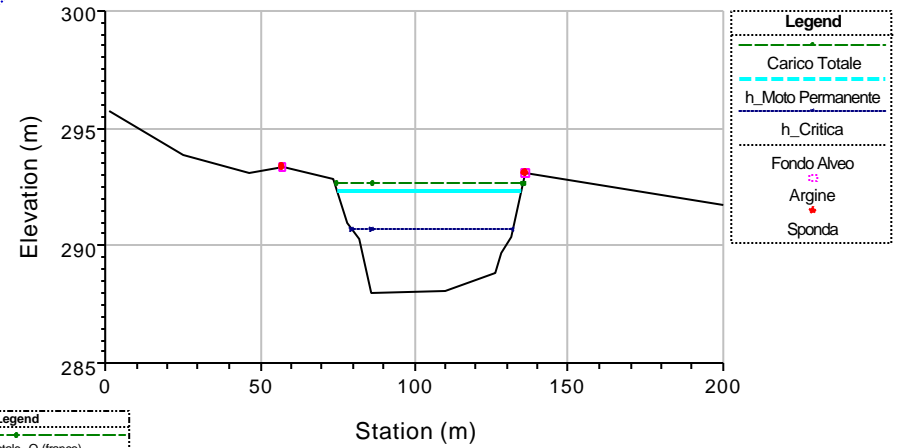


Particolare relativo al Ponte stradale sull'Arno in località Rassina

Fiume Arno a Rassina

Geom: Sezioni rilievo ing. Chiarini ('94) Flow: Portata di franco a valle di Rassina

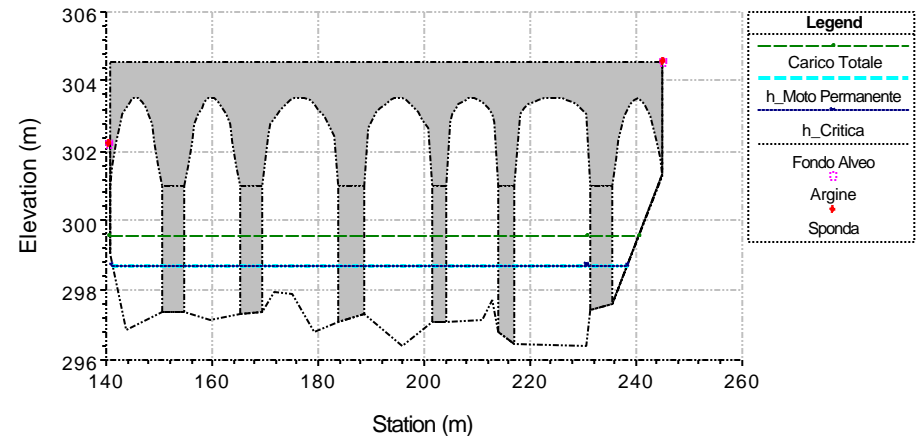
Sezione 25



Fiume Arno a Rassina

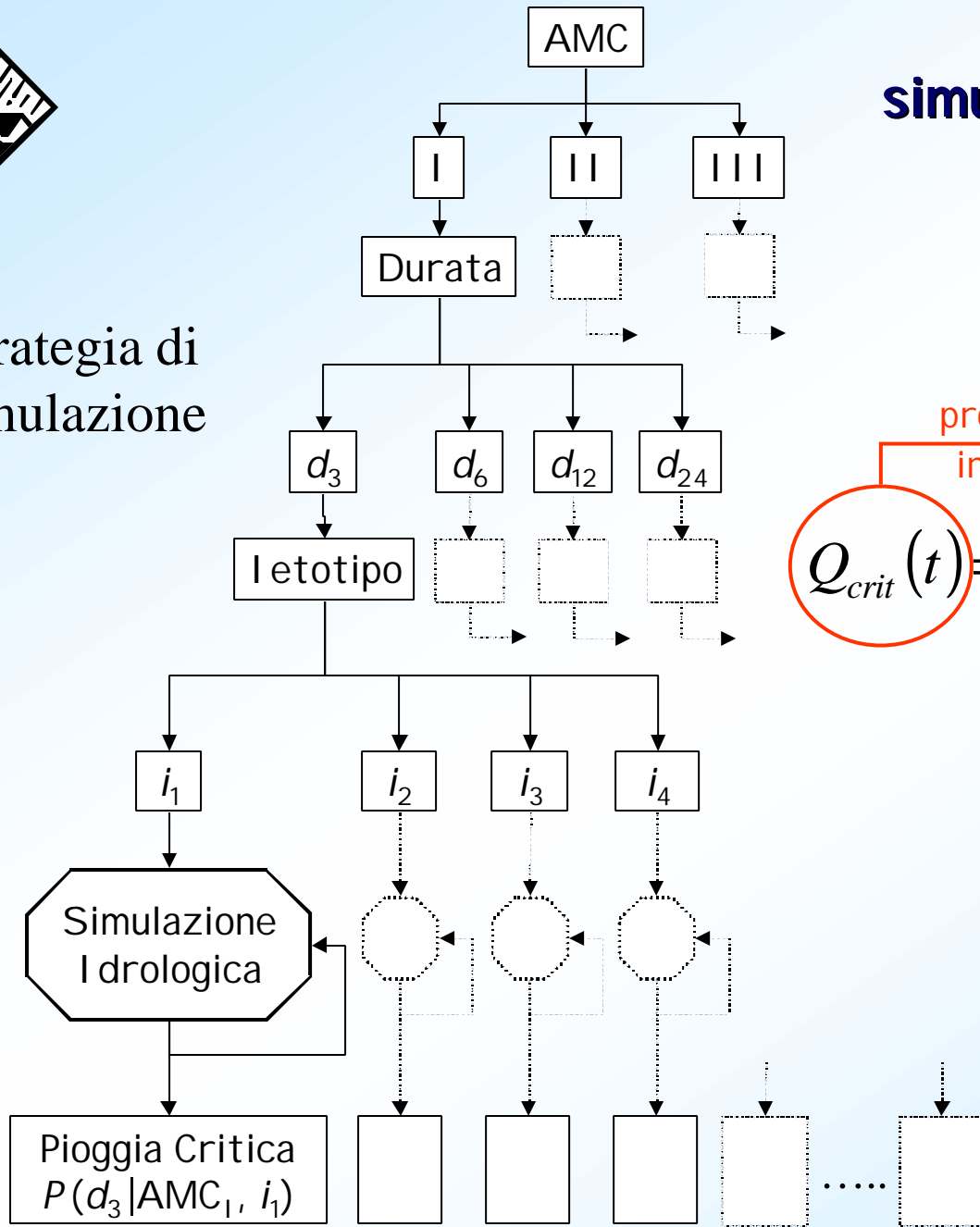
Geom: Sezioni rilievo ing. Chiarini ('94) Flow: Portata di franco a valle di Rassina

Sezione 6 - Ponte sull'Arno





# Strategia di simulazione



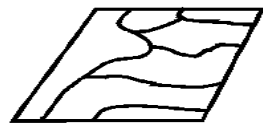
# simulazione idrologica

problema inverso

$$Q_{crit}(t) = j(p(\mathbf{x}, t)), \quad t - t_c < t < t$$



Informazione spazialmente distribuita per la costruzione del modello FEST98



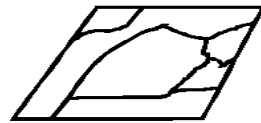
Geolitologia

10	41	26	26
10	10	3	3
10	35	35	35
10	53	7	7



1	1	1	1
1	4	3	2
1	3	1	1
1	1	1	2

Uso del suolo



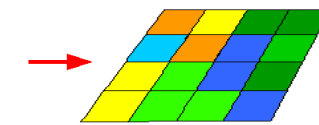
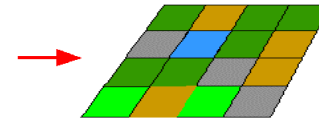
335	332	332	332
332	243	243	111
332	243	243	243
332	221	221	221

DEM



100	50	30	20
70	20	19	7
100	37	50	40
80	90	41	29

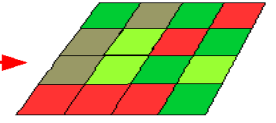
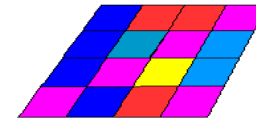
Gruppi idrologici di suolo



CN<sub>11</sub>

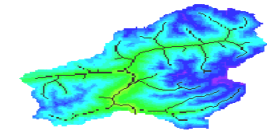
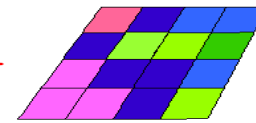


Massimo potenziale di ritenzione del terreno



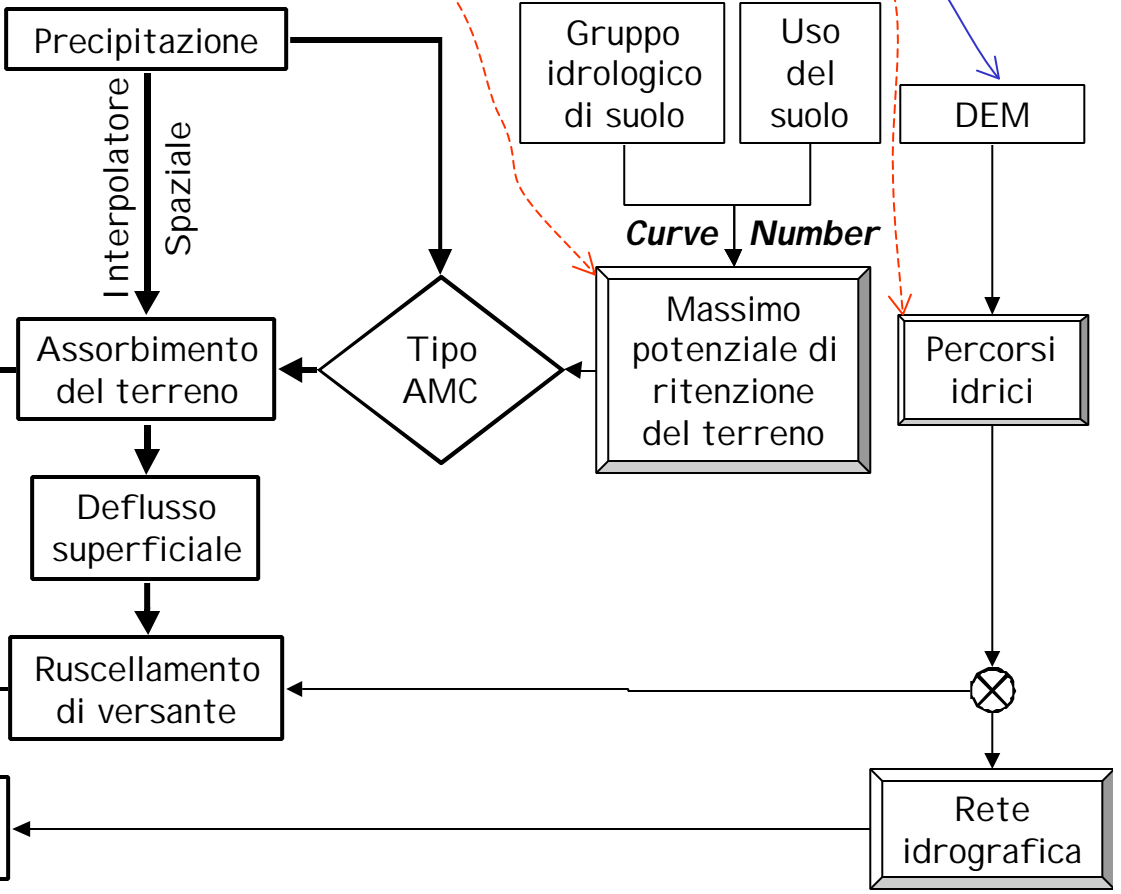
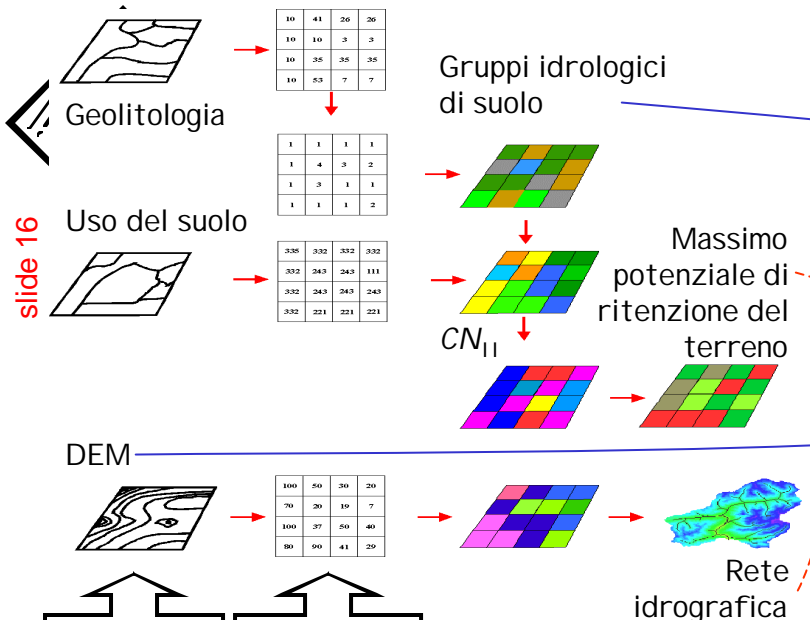
Mappe vettoriali

Mappe raster



Rete idrografica

slide 16



Schema a blocchi del modello FEST98 per la simulazione idrologica di eventi di piena

R. Rosso - Il Servizio di Piena (4)





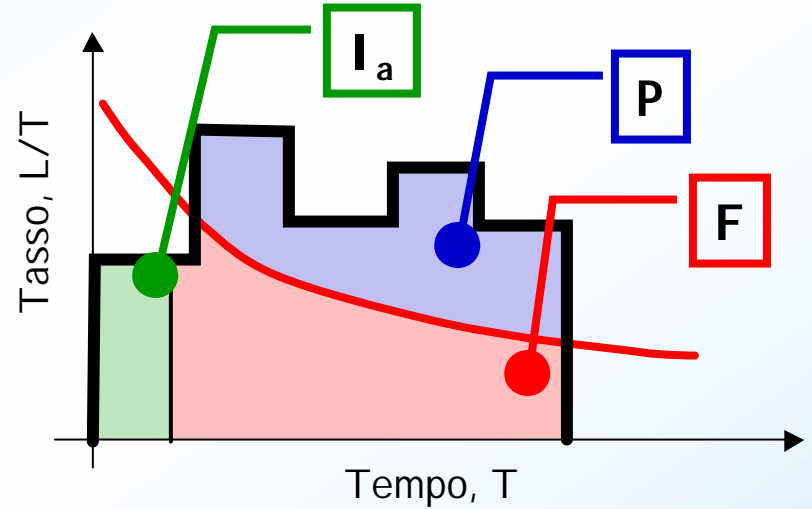
# Componenti del modello FEST98 per la simulazione idrologica di eventi di piena

## Assorbimento: metodo SCS-CN

slide 17

$$R_u = \frac{(P_u - I_a)^2}{P_u - I_{au} + S_u}$$

$$P_{um} = \int_0^{t_m} p_u(t) dt$$



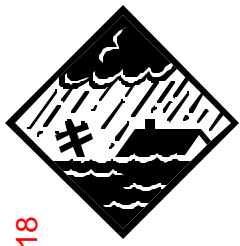
R. Rosso - Il Servizio di Piena (4)

$$R_{um} = \begin{cases} 0, & \text{se } P_{uA} < cS_u \\ \frac{(P_{um} - cS_u)^2}{P_{um} + (1-c)S_u}, & \text{se } P_{uA} > cS_u \end{cases}$$

calcolo sequenziale

$$\Delta R_{um} = R_{um} - R_{um-1} \longrightarrow r_u(t_m) = r_{um} = \Delta R_{um} / \Delta t_m$$

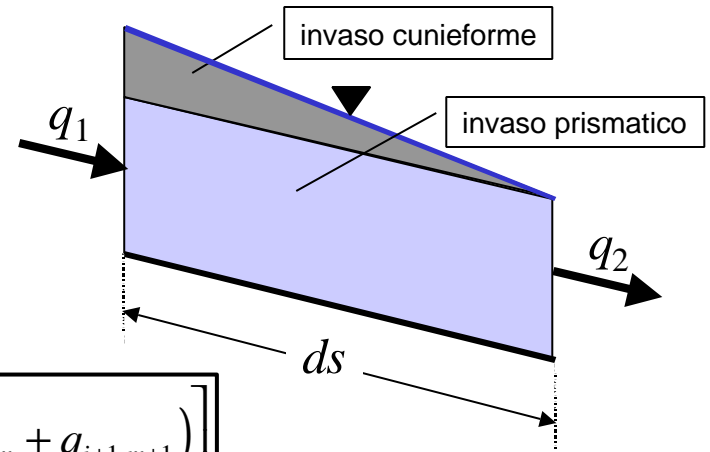
tasso di ruscellamento prodotto dalla cella **u**-esima durante l'intervallo **m**-esimo



slide 18

# Componenti del modello FEST98 per la simulazione idrologica di eventi di piena

## Propagazione: metodo Muskingum-Cunge



$$w = k[xq_i + (1-x)q_{i+1}], \quad e \quad Dw_{m,m+1} = Dt \cdot \left[ \frac{1}{2}(q_{i,m} + q_{i,m+1}) - \frac{1}{2}(q_{i+1,m} + q_{i+1,m+1}) \right]$$

$$q_{i+1,m+1} = C_1 q_{i,m+1} + C_2 q_{i,m} + C_3 q_{i+1,m} \quad \leftarrow C_1 = \frac{Dt - 2kx}{2k(1-x) + Dt}, \quad C_2 = \frac{Dt + 2kx}{2k(1-x) + Dt}, \quad C_3 = \frac{-Dt + 2k(1-x)}{2k(1-x) + Dt}$$

$$k = \frac{Ds}{w}, \quad e \quad x = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{q^*}{Bi_f w Ds} \right)$$

fattori calcolati in funzione di una portata  $q^*$  mediata tra  $q_{i,m+1}$ ,  $q_{i,m}$  e  $q_{i+1,m}$

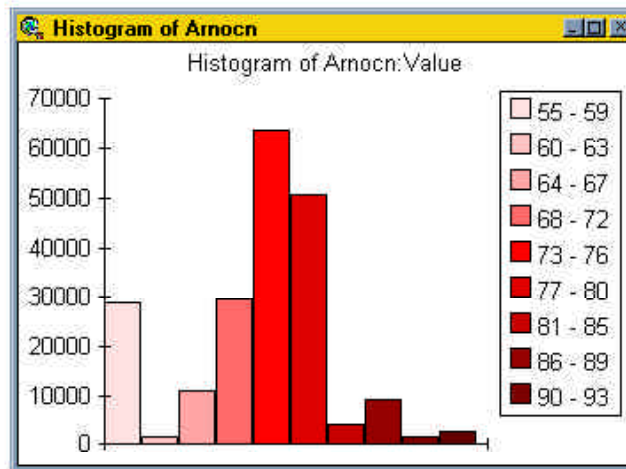
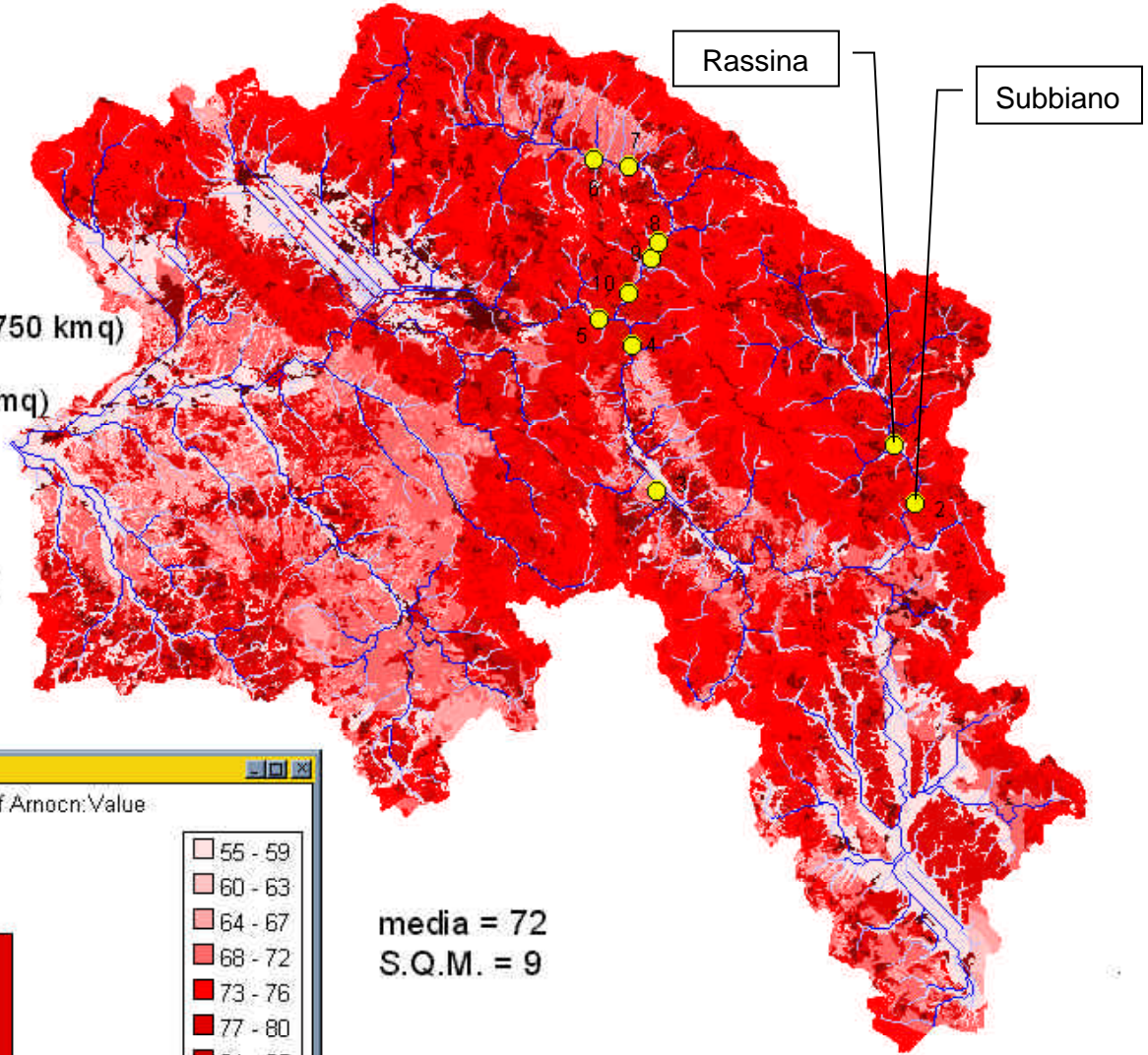
Identificati dalla matrice delle aree scolanti i valori dei parametri di forma e scabrezza, vengono valutati i pesi  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  e, quindi, la portata incognita  $q_{i+1,m+1}$ , cui si somma l'afflusso netto sulla cella,  $r_{um+1}$ , calcolato con il metodo SCS-CN



# Carta del parametro CN per AMC II del bacino dell'Arno

● SEZIONI CRITICHE

- 1 Rassina (600 kmq)
- 2 Subbiano (738 kmq)
- 3 S. Giovanni Valdarno (2750 kmq)
- 4 Rignano (3095 kmq)
- 5 Nave di Rosano (3900 kmq)
- 6 Sagginale (395 kmq)
- 7 Vicchio (498 kmq)
- 8 Contea (748 kmq)
- 9 Rufina (765 kmq)
- 10 Pontassieve (831 kmq)



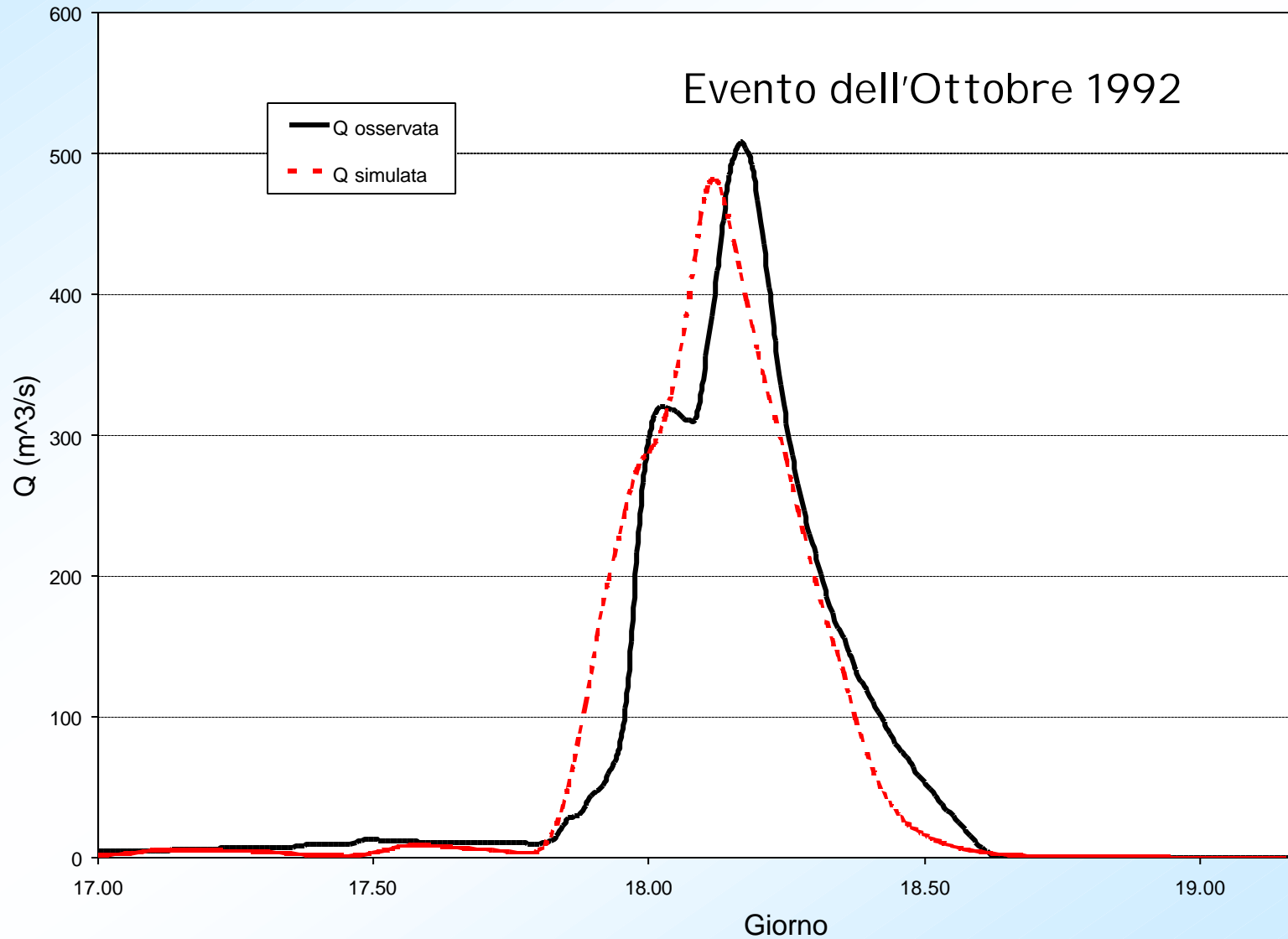
media = 72  
S.Q.M. = 9

# Validazione del modello FEST98 per la stazione idrometrica di Subbiano (738 Km<sup>2</sup>)



slide 20

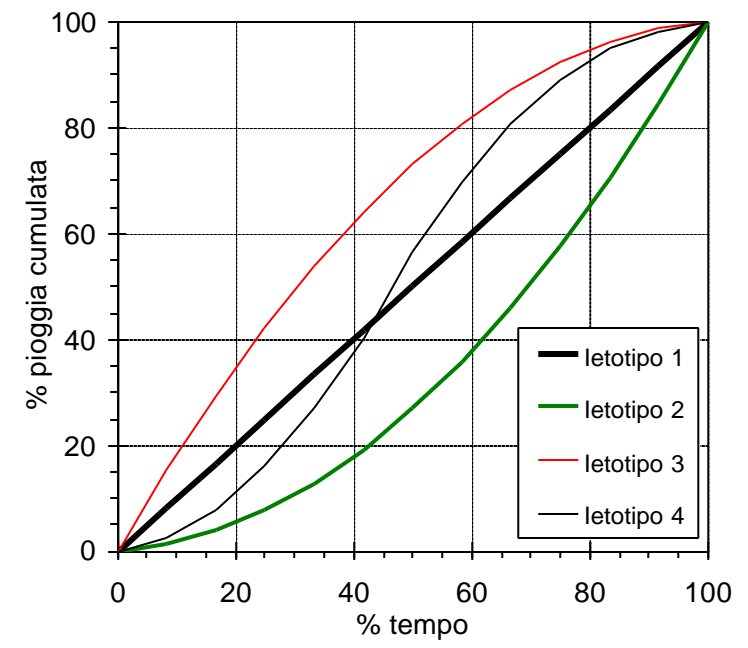
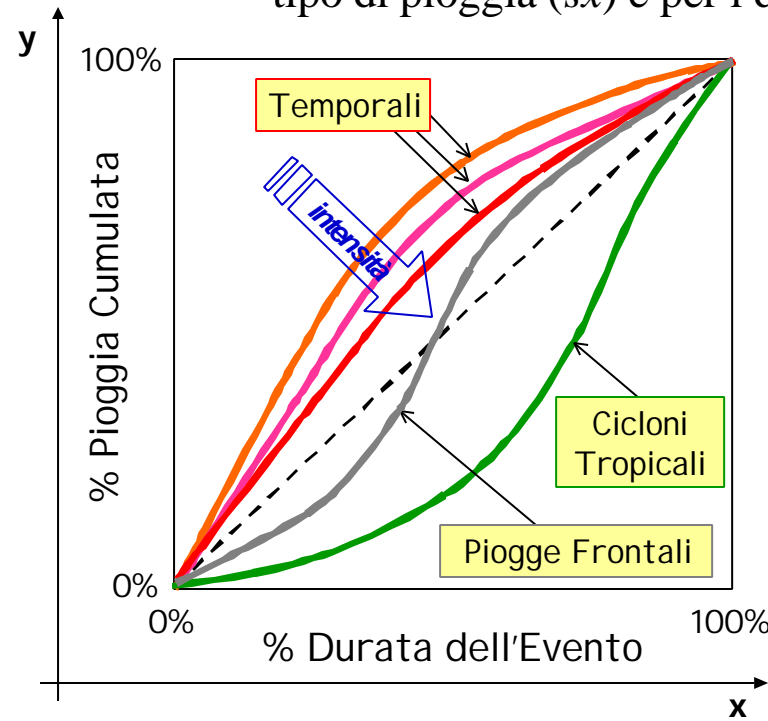
R. Rosso - Il Servizio di Piena (4)



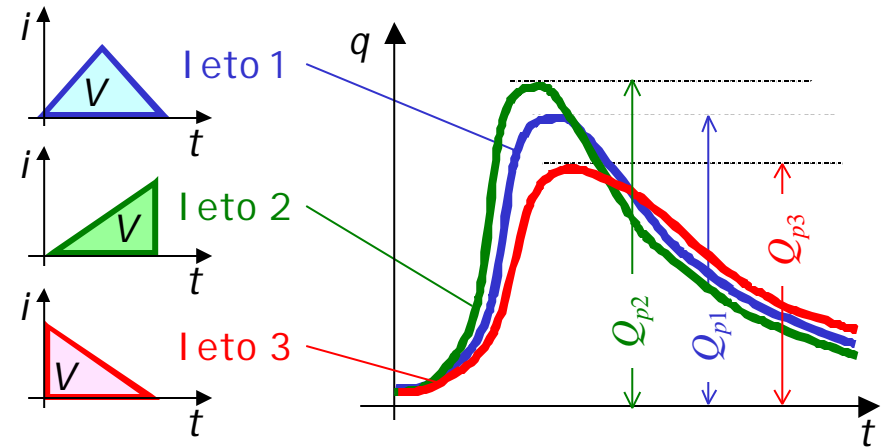


slide 21

Profilo di pioggia (andamento temporale dell'altezza di pioggia cumulata rinormalizzata rispetto alla durata dell'evento e della relativa altezza totale di precipitazione) in ragione del tipo di pioggia ( $sx$ ) e per i diversi ietogrammi (ietotipi) utilizzati ( $dx$ )



Effetto della forma dello ietogramma sull'idrogramma di piena



R. Rosso - Il Servizio di Piena (4)



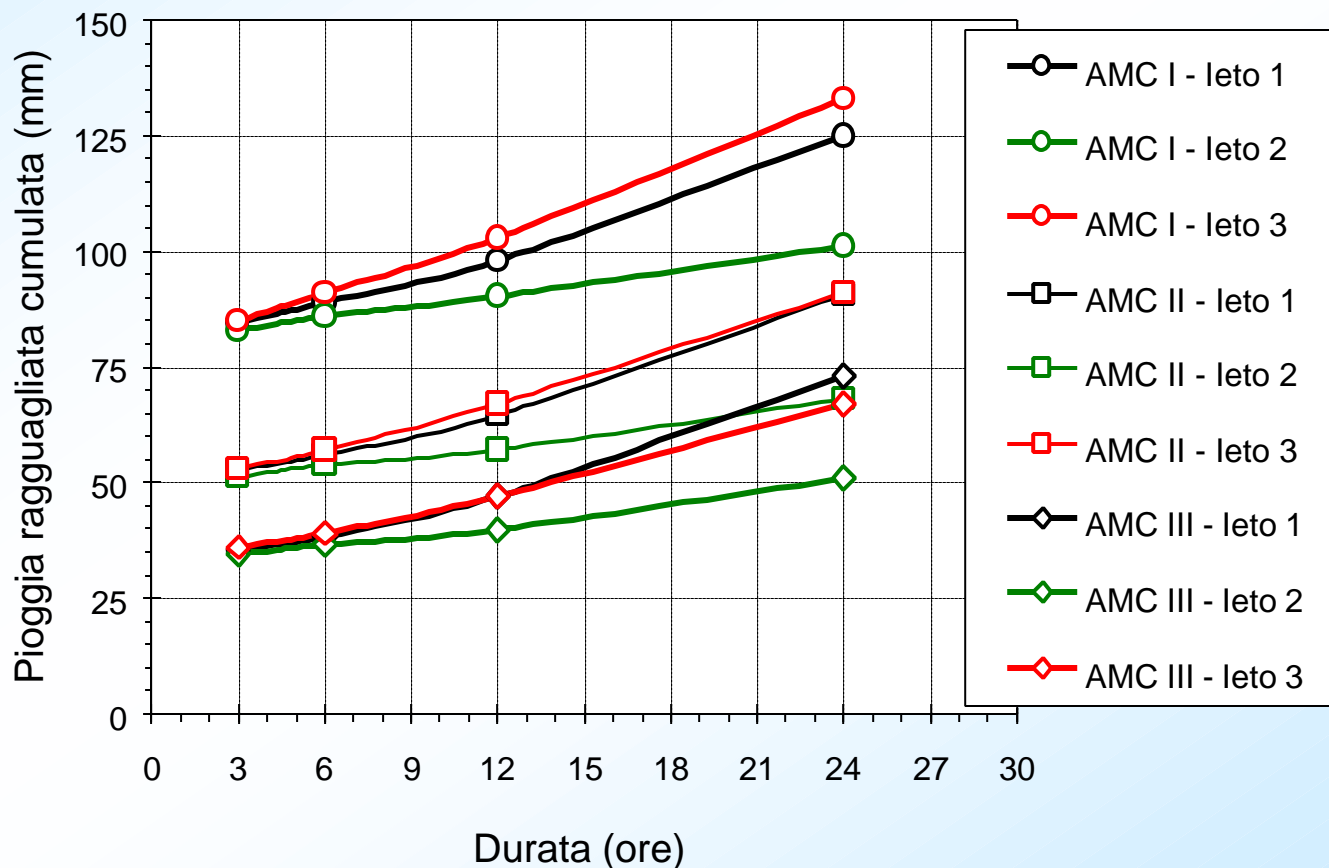
## Soglie pluviali per la sezione critica di Rassina (AR)

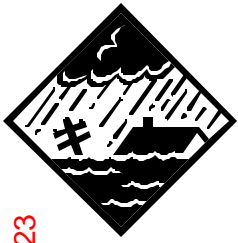
Area sottesa: 600 Km<sup>2</sup>. Portata critica di riferimento: 495 m<sup>3</sup>/s.

**Ietotipi:** 1: uniforme, 2: triangolare crescente, 3: triangolare decrescente.

**Imbibimento iniziale** con AMC di tipo: I. bacino asciutto, II. bacino mediamente imbibito, e III. bacino fortemente imbibito.

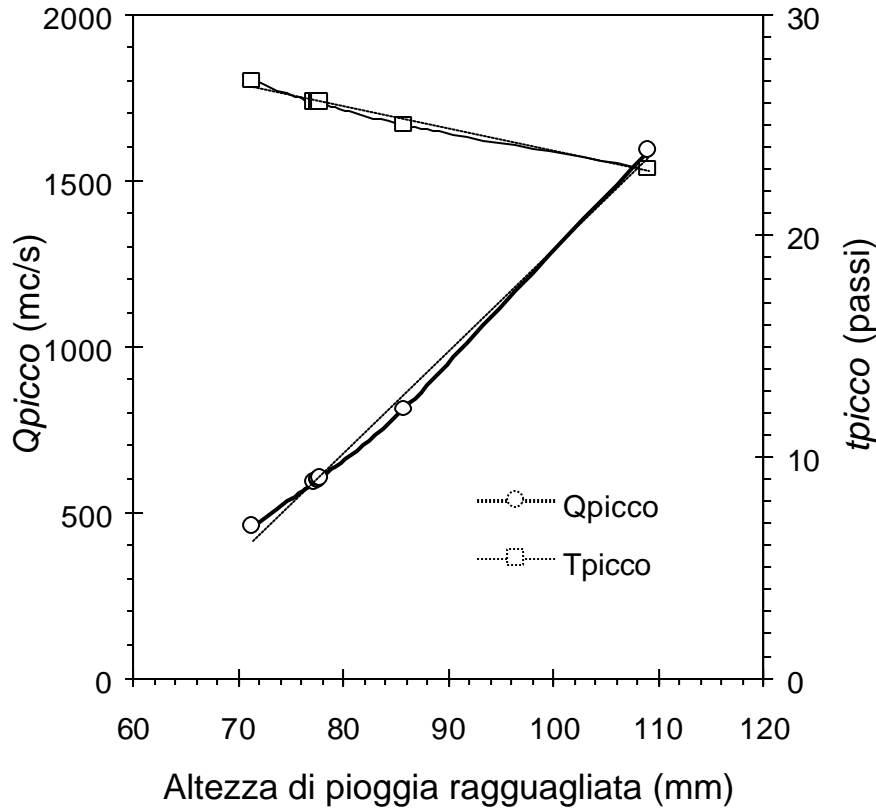
Sezione Critica di Rassina



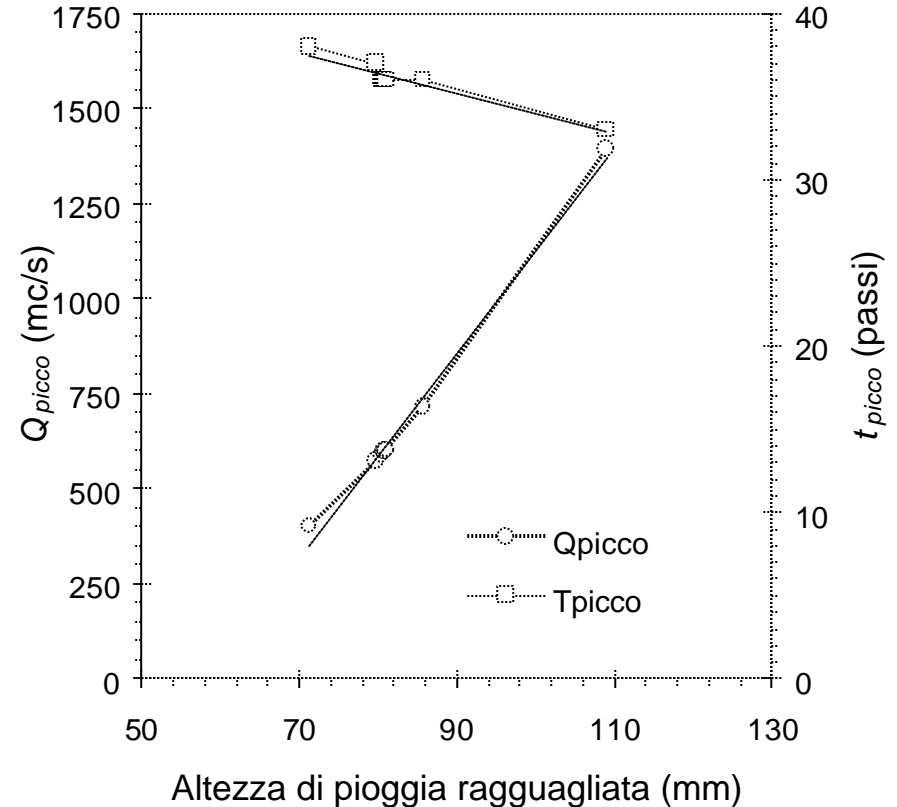


# Legame tra altezza di pioggia ragguagliata, portata di picco e tempo di picco per diversa durata (ietotipo 2)

**Sezione Critica di Subbiano  
letotipo 2 -  $d = 3$  ore**

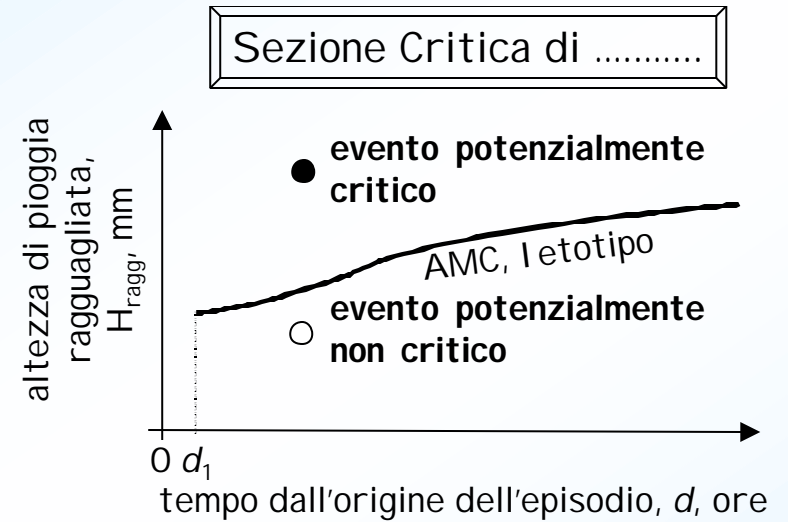


**Sezione Critica di Subbiano  
letotipo 2 -  $d = 6$  ore**





## modalità d'impiego delle soglie pluviali



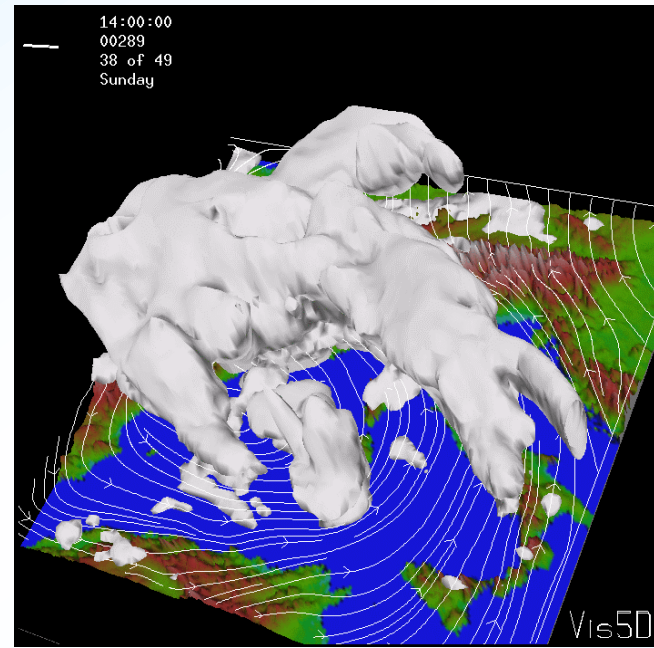
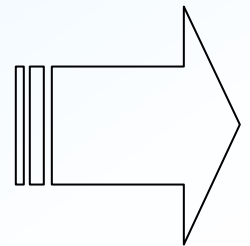
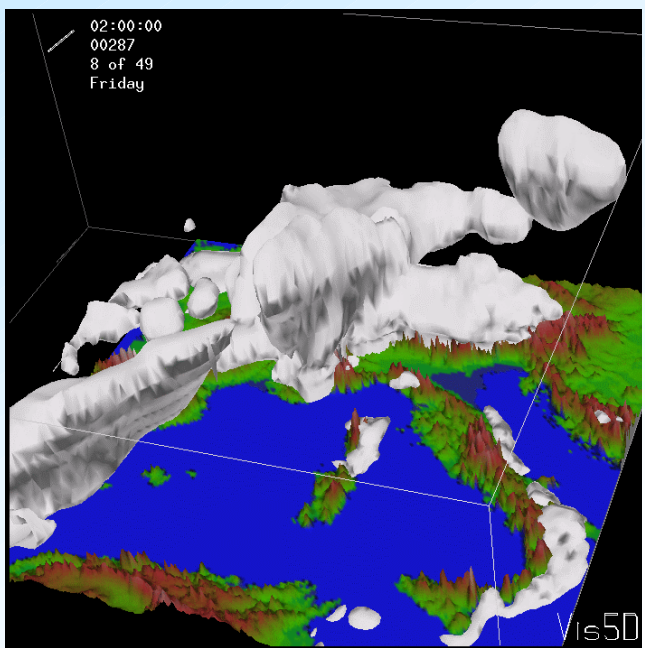
### Applicazione seriale a valle di previsioni quantitative di precipitazione (Caso S).

In questo caso si suppone di poter prevedere il volume di pioggia,  $P_{prev}(t_1)$  che cadrà sul bacino tra l'istante attuale  $t$  e un istante futuro  $t_1$ , dove la distanza tra l'istante attuale e quello futuro è ovviamente inferiore al massimo orizzonte di previsione quantitativa della precipitazione  $\Delta$  (cioè  $t_1 - t < \Delta$ ); naturalmente la stima di  $P_{prev}(t_1)$  migliora a mano a mano che  $t$  tende a  $t_1$ . In questo caso la stima  $P_{prev}(t_1 - t_0)$  va confrontata con  $P_{lim}(d | AMC, ieto)$  dove  $t_0 > t$  indica l'istante previsto di inizio del nubifragio.

### Applicazione in parallelo con registrazioni telepluviometriche (Caso P).

In questo caso si suppone di disporre delle registrazioni in continuo del tasso di pioggia in  $N$  telepluviometri dislocati sul bacino e nelle sue vicinanze, indicate con  $p_i(t)$  dove  $i=1, \dots, N$ , e di voler monitorare in qualsivoglia istante temporale  $d$  a partire dall'inizio del nubifragio la situazione attuale, confrontando l'altezza di pioggia cumulata e ragguagliata sul bacino,  $H_{ragg}(d)$ , con la soglia pluviali  $P_{lim}(d | AMC, ieto)$ .

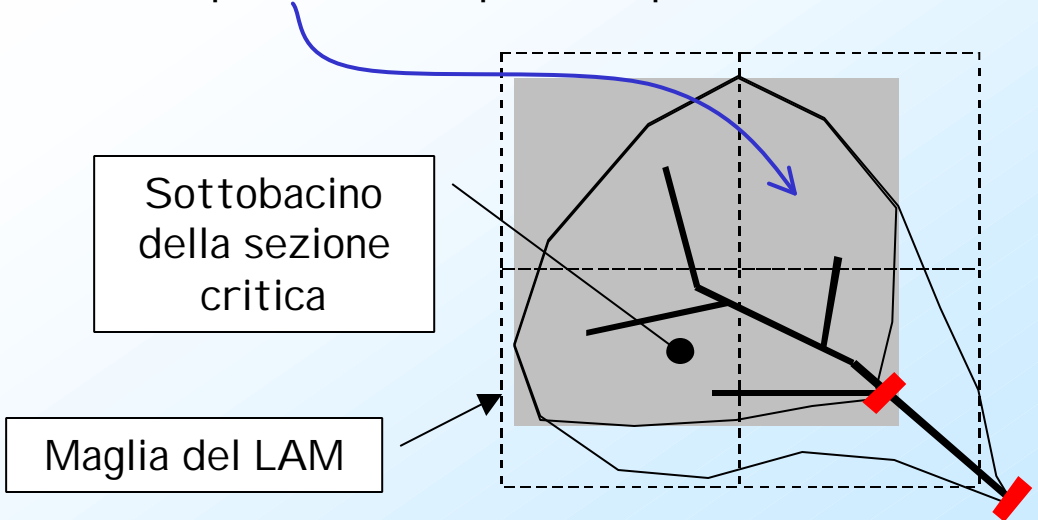




# Caso S

Intersezione tra bacino sotteso da una sezione critica e griglia di un modello meteorologico ad area limitata

Il mibimento iniziale (Tipo AMC):  
Precipitazioni nel periodo precedente



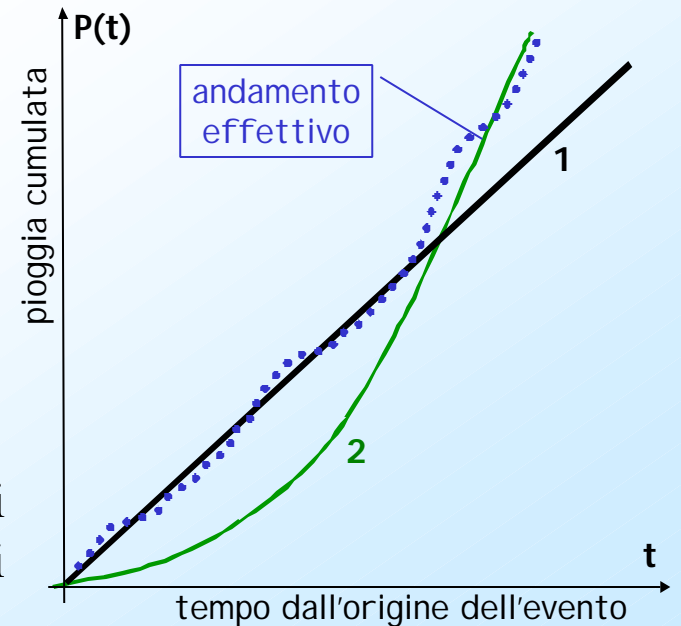
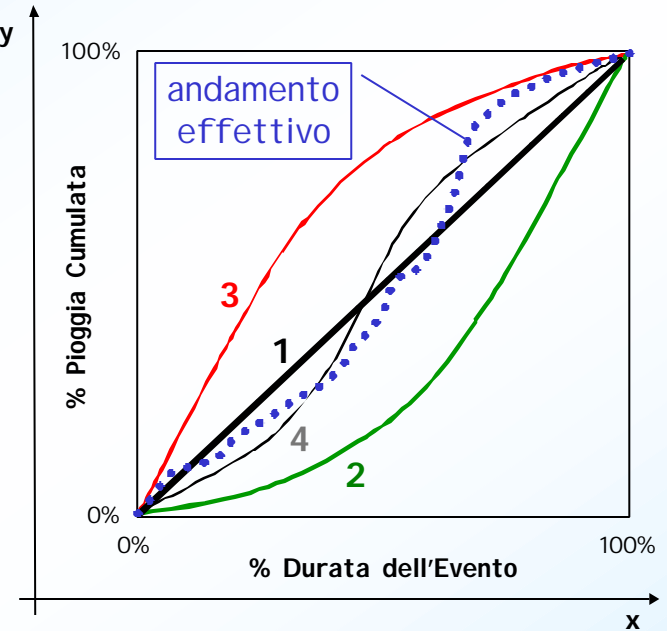


andamento temporale della  
pioggia cumulata e  
rappresentazioni  
schematiche

# Casi P & S

la scelta della migliore approssimazione della forma di pioggia deve essere aggiornata durante l'evoluzione temporale della stessa, cioè a mano a mano che sono noti nuovi dati osservati o nuove previsioni quantitative di pioggia

adattamento di andamenti schematici a quello reale in istanti diversi





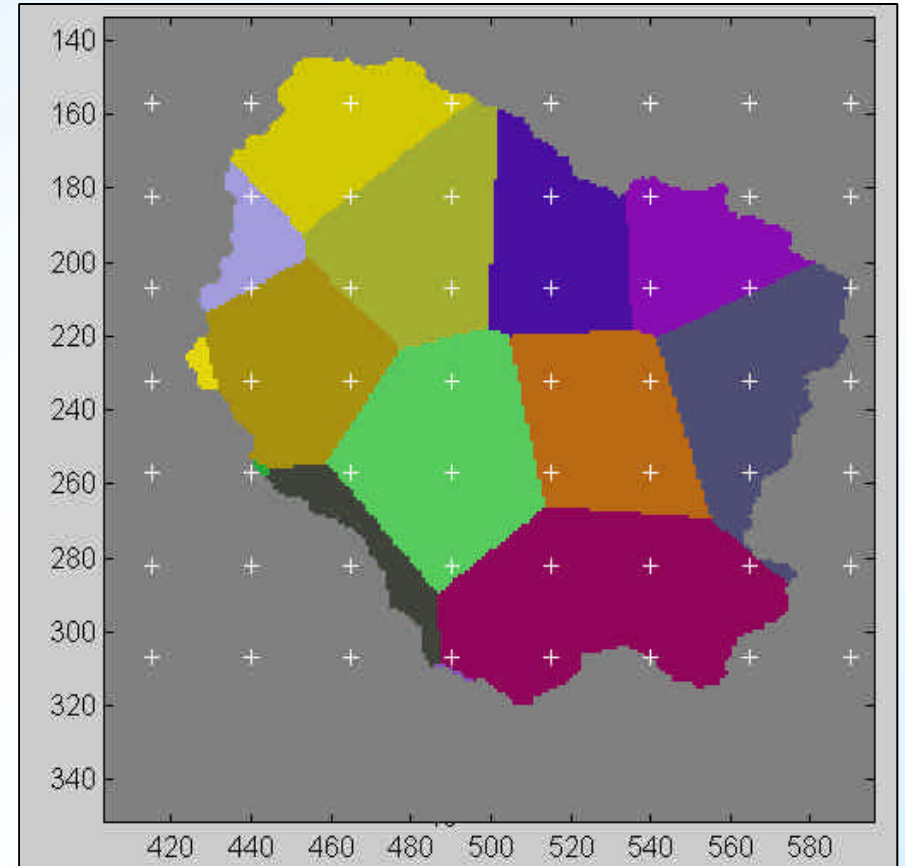
# Caso P

Peso di stazione  
(metodo di Thiessen)

$$w_k = \frac{A_k}{\sum_{k=1}^N A_k}$$

Correzione dei pesi per tenere conto della variabilità spaziale della risposta idrologica:  
PESO GEOMORFOLOGICO di OGNI CELLA

$$H_{ragg}(t) = \sum_{i=1, n\text{ celle}} g_i \left( \sum_{k=1}^{n\text{ pluviografi}} w_k h_k \right)$$



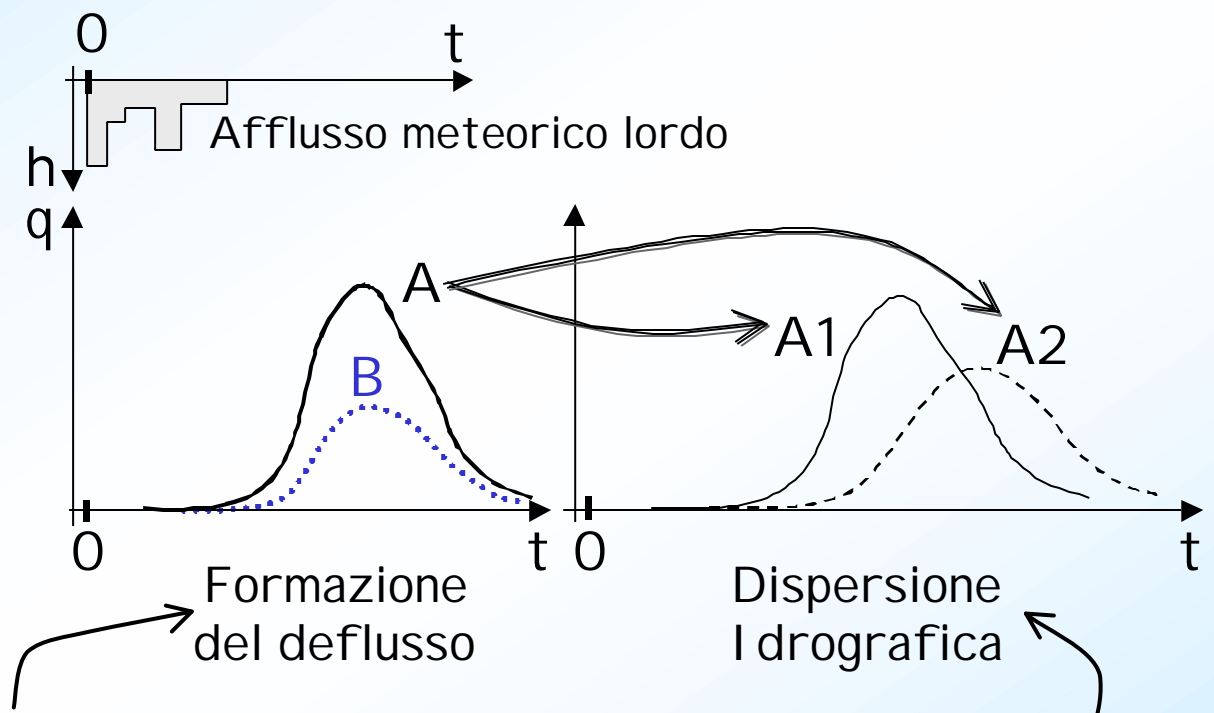
Poligonazione di Thiessen (bacino del Casentino): coordinate espresse in celle DEM



# Caso P

## Effetto della variabilità spaziale

slide 28



Formazione di deflusso su un'area poco permeabile (A) e un'area molto permeabile (B)

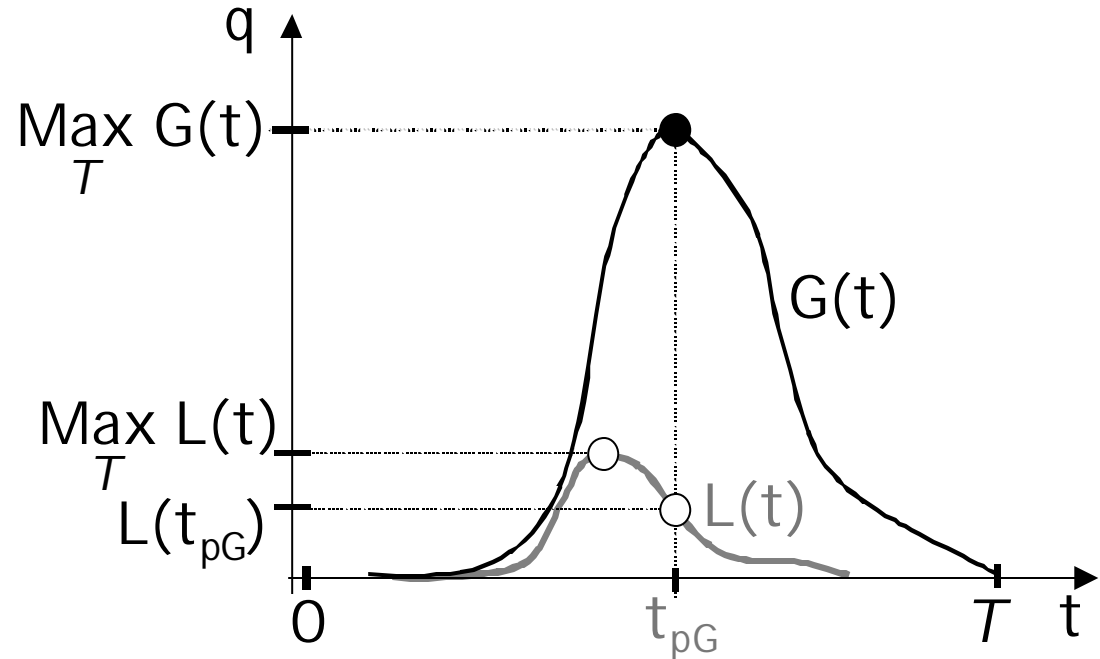
Successiva propagazione del deflusso A lungo un percorso con scarsa laminazione (A1) e con elevata laminazione (A2)

R. Rosso - Il Servizio di Piena (4)



# Caso P

$G(t)$ : I drogramma Globale (Intero Bacino)



$L(t)$ : Contributo Locale (Cella Generica)

**Pesi geomorfologici**

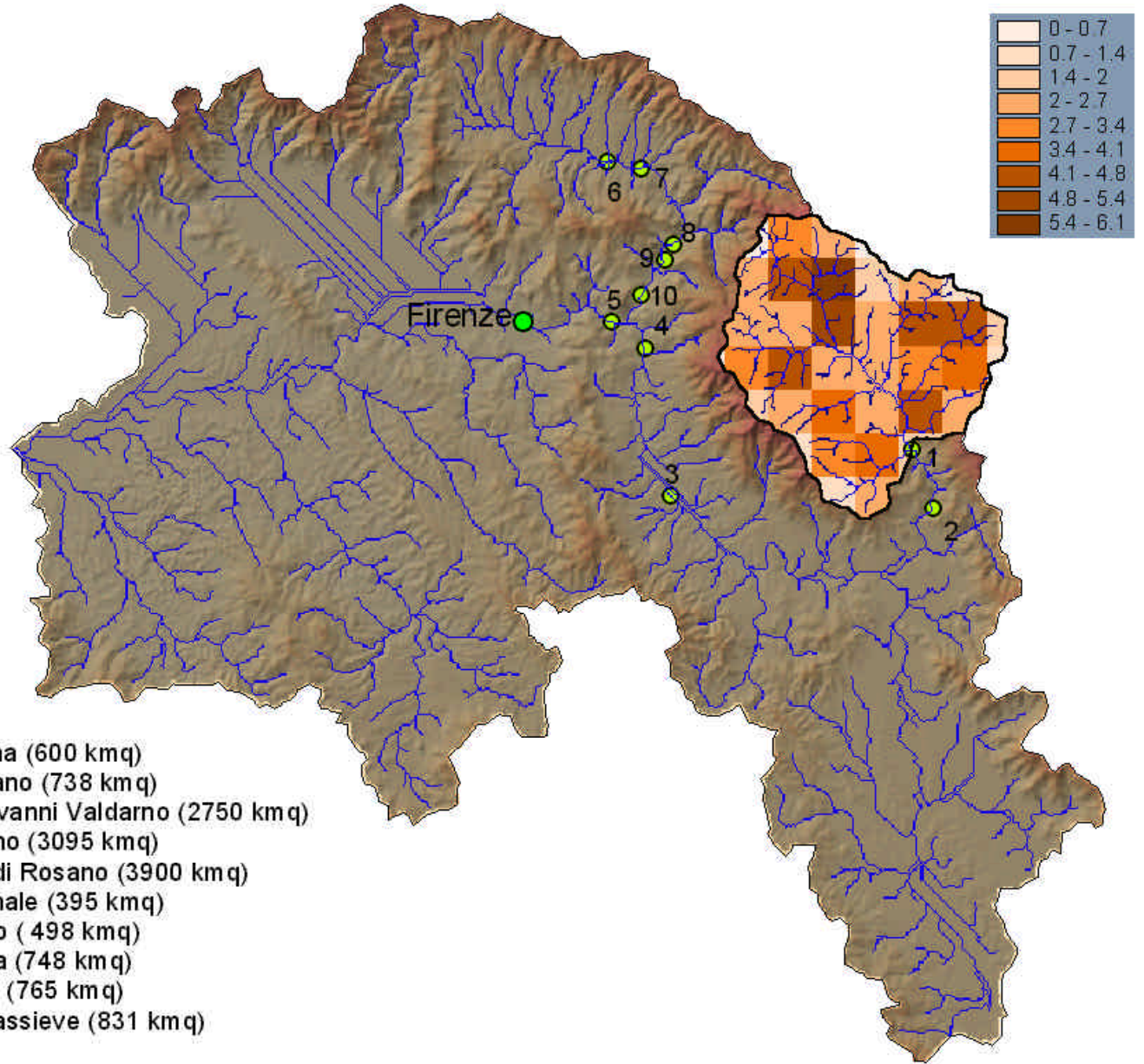
$$pP = \frac{\max_T L(t)}{\max_T G(t)}$$

$$yY = \frac{L(t = t_{pG})}{\max_T G(t)}, \quad \text{dove} \quad t_{pG} : G(t_{pG}) = \max_T G(t)$$



# Caso P

Pesi geomorfologici ( $pP$ ) per il Casentino in % per la durata di 6 ore e condizioni iniziali AMC tipo II



$$pP = \frac{\max T L(t)}{\max T G(t)}$$

- 1 Rassina (600 kmq)
- 2 Subbiano (738 kmq)
- 3 S. Giovanni Valdarno (2750 kmq)
- 4 Rignano (3095 kmq)
- 5 Nave di Rosano (3900 kmq)
- 6 Sagginale (395 kmq)
- 7 Vicchio (498 kmq)
- 8 Contea (748 kmq)
- 9 Rufina (765 kmq)
- 10 Pontassieve (831 kmq)

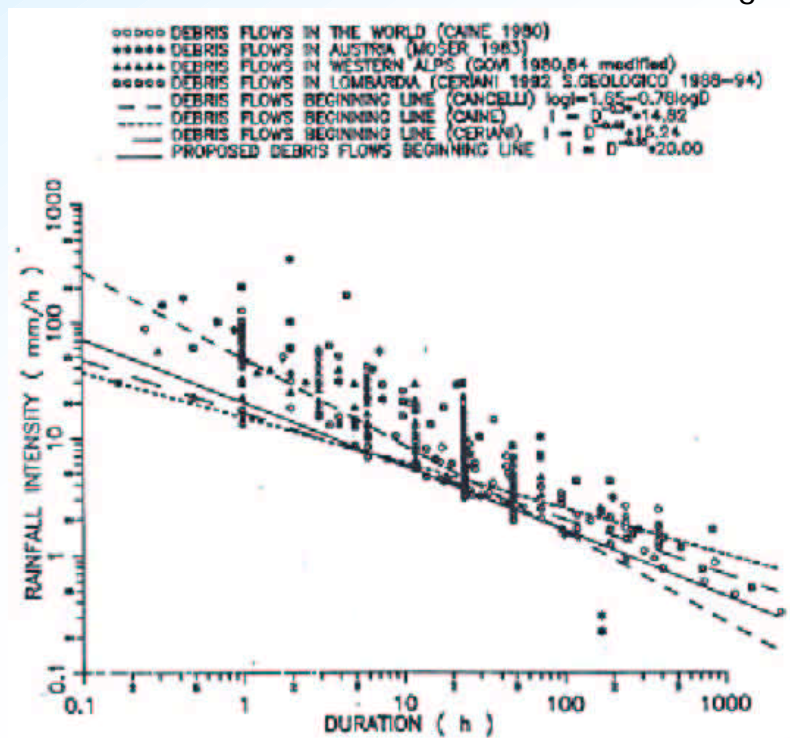


# Soglie pluviali di innesco delle frane superficiali

Shallow landslides and debris flows from steep hillsides triggered by heavy rainfall during two weeks were the major source of sediment and debris deposited by flood waters,

**Venezuela Flash-flood and Landslide Disaster,**  
December 1999

Source: U.S. Geological Survey



Esempio di soglie pluviali empiriche per la previsione dei fenomeni di instabilità superficiale



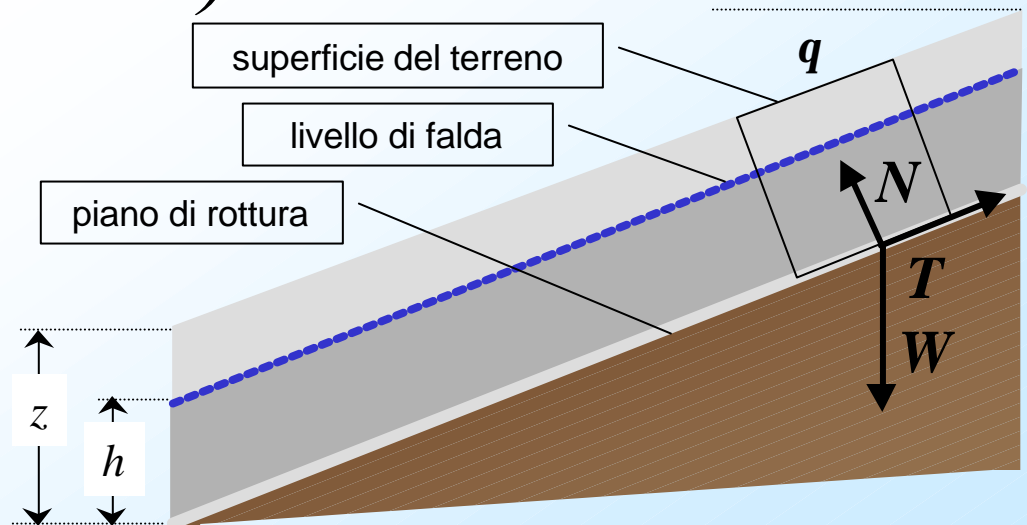
## Stabilità del pendio

$$t = \cancel{c} + (s - u) \tan f \quad \text{pendio indefinito}$$

$$(r_s g z \cos q) \sin q = (r_s g z \cos^2 q - r_w h g \cos^2 q) \tan f$$

$$w = \frac{h}{z} = \frac{r_s}{r_w} \left( 1 - \frac{\tan q}{\tan f} \right)$$

$$0 \leq w = h/z \leq 1$$





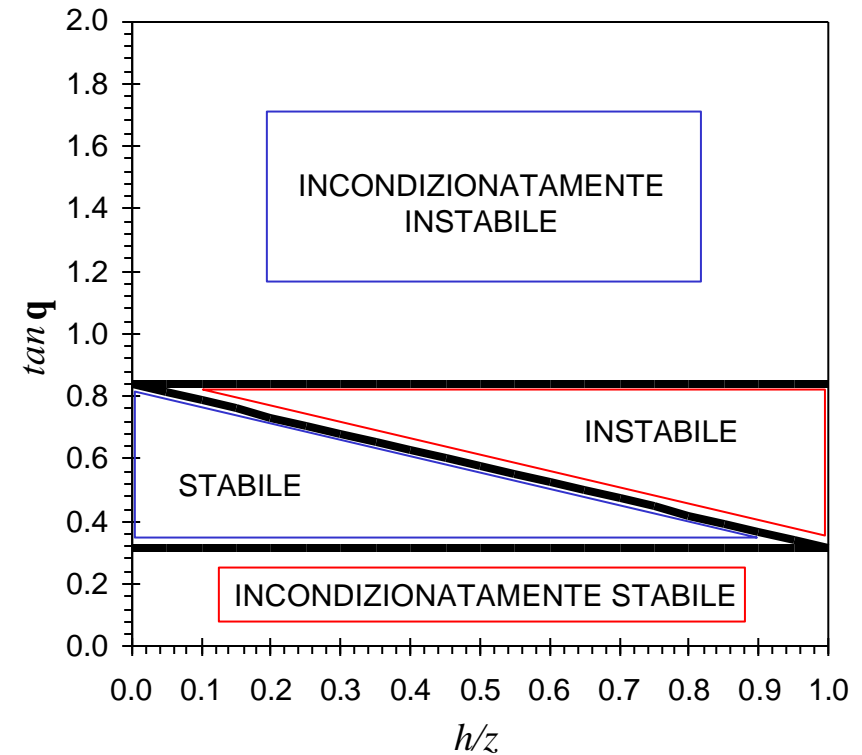


se  $\tan q < (1 - r_w/r_s) \tan f$ , la coltre detritica è **incondizionatamente stabile**, poichè il pendio rimane stabile per qualunque condizione di flusso

se  $\tan q \geq \tan f$  la coltre detritica è **incondizionatamente instabile**, poichè il pendio risulta instabile anche in assenza di flussi idrici, ossia per  $w = 0$

se  $(1 - r_w/r_s) \tan f < \tan q < \tan f$  e  $w < (1 - \tan q / \tan f) r_s / r_w$ , la coltre risulta **stabile**

se  $(1 - r_w/r_s) \tan f < \tan q < \tan f$  e  $w > (1 - \tan q / \tan f) r_s / r_w$ , la coltre risulta **instabile**





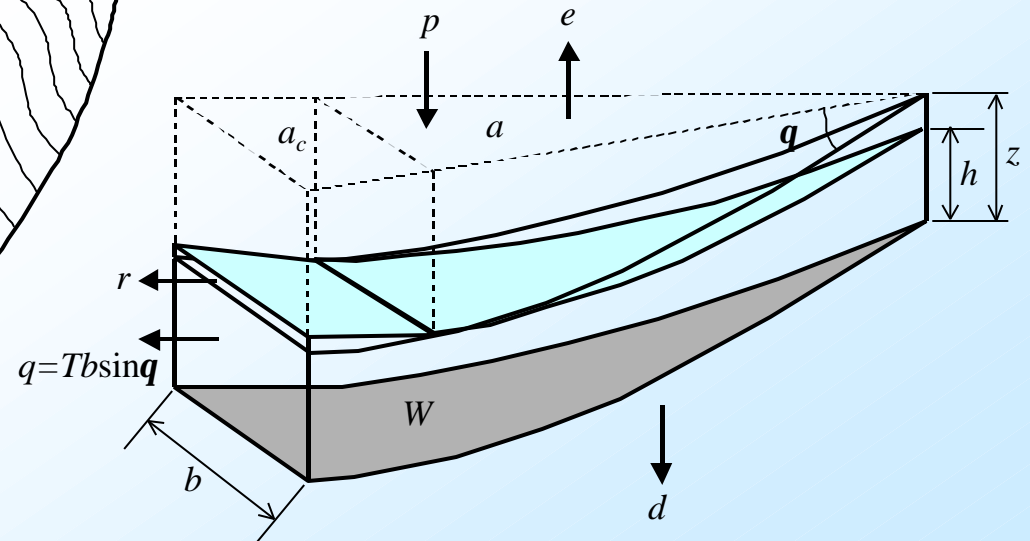
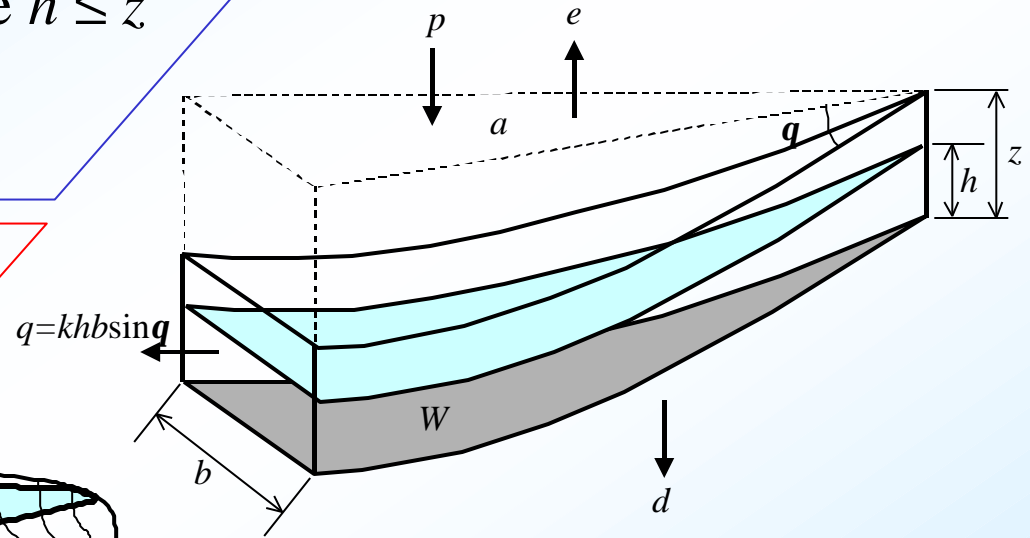
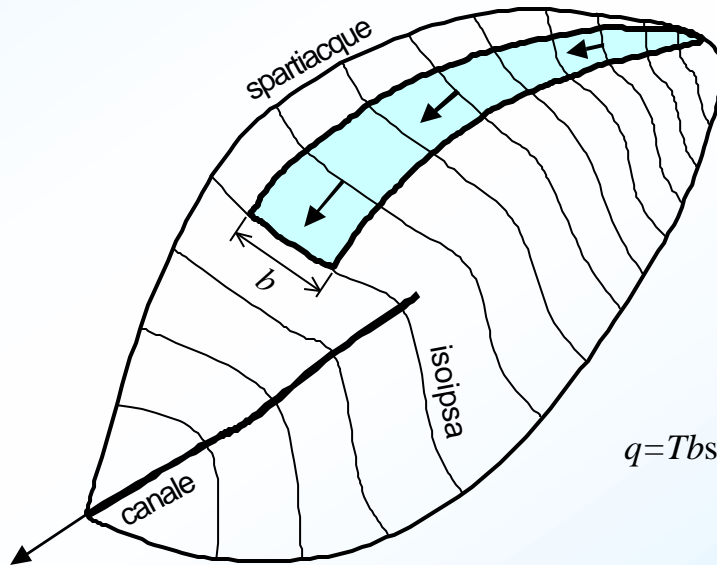
# Flusso idrico nel versante

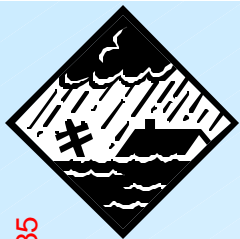
$$ap - q = \frac{dW}{dt} = a \frac{dh}{dt} \quad \text{se } h \leq z$$

$$ap - q - r = 0 \quad \text{se } h > z$$

$$q = (bh \cos q) K \tan q$$

$$= bhK \sin q$$





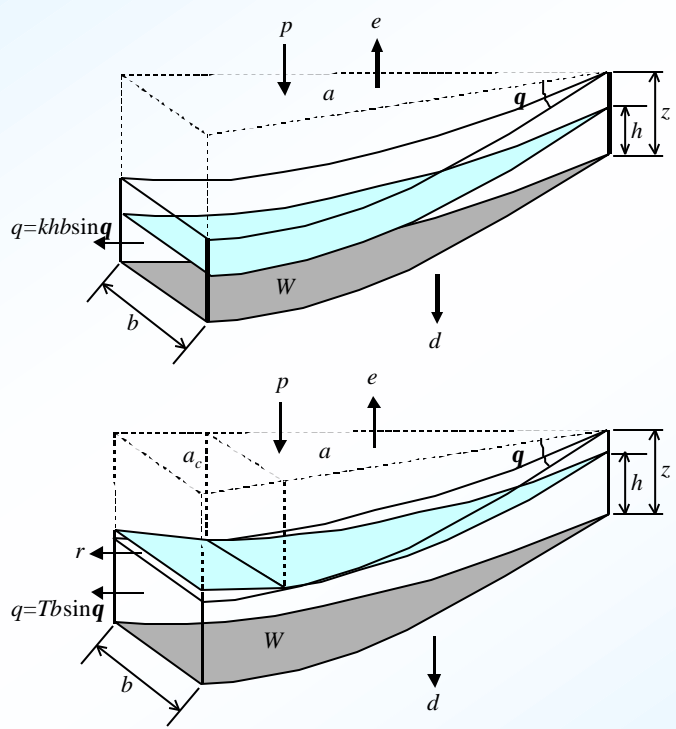
Flusso idrico nel versante

$$h = \frac{ap}{bK \sin \mathbf{q}} \left( 1 - e^{-\frac{bK \sin \mathbf{q}}{a} t} \right)$$

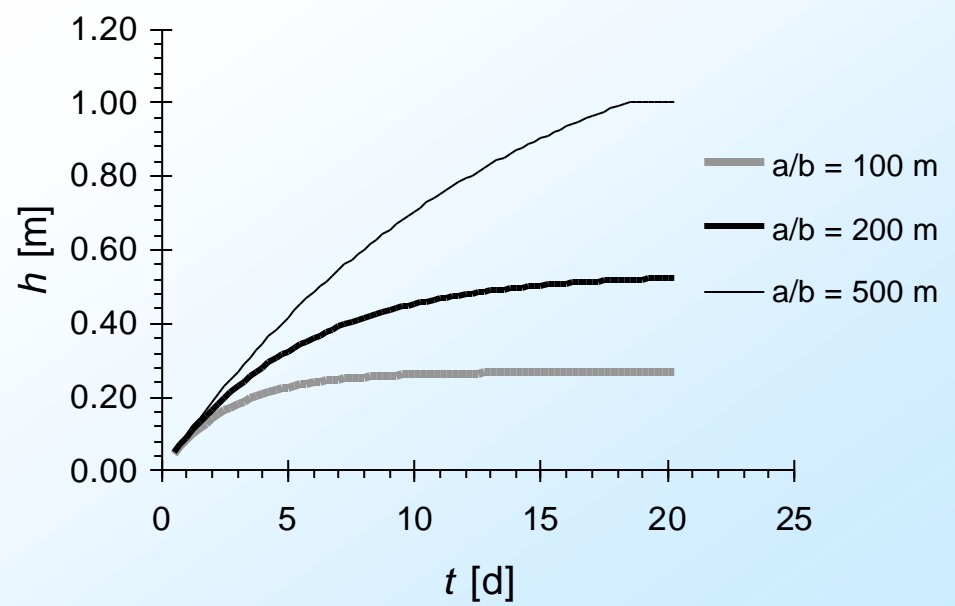
$$h = \begin{cases} \frac{ap}{bK \sin \mathbf{q}} \left( 1 - e^{-\frac{bK \sin \mathbf{q}}{a} t} \right) & , \text{ se } t \leq -\frac{a}{bK \sin \mathbf{q}} \ln \left( 1 - \frac{bT \sin \mathbf{q}}{ap} \right) \\ z & , \text{ se } t > -\frac{a}{bK \sin \mathbf{q}} \ln \left( 1 - \frac{bT \sin \mathbf{q}}{ap} \right) \end{cases}$$

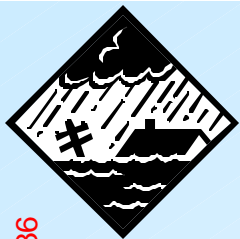
se  $ap(bK \sin \mathbf{q})^{-1} \leq z$

se  $ap(bK \sin \mathbf{q})^{-1} > z$



pendenza: 35 °, area drenata: 0.01 Km<sup>2</sup>,  
 trasmissività: 65 mq/d, spessore di coltre: 1.00 m,  
 tasso di pioggia: 100 mm/d



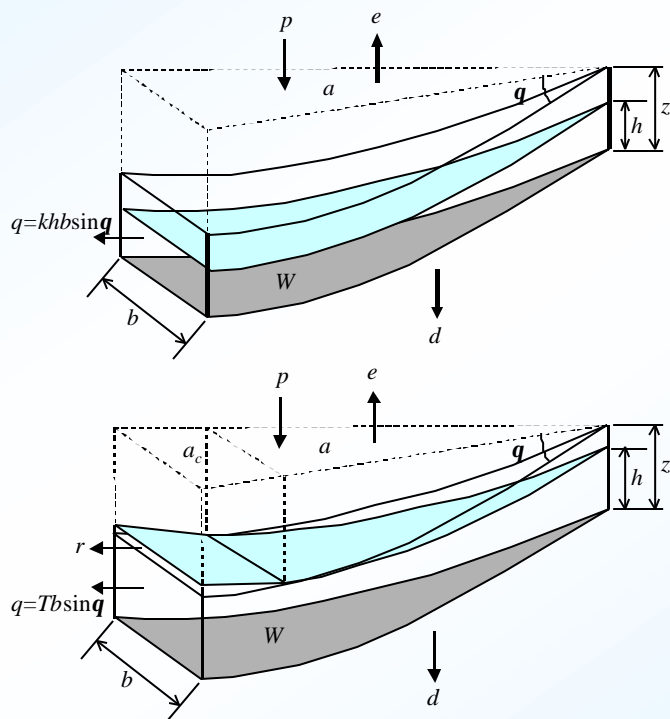


Flusso idrico nel versante

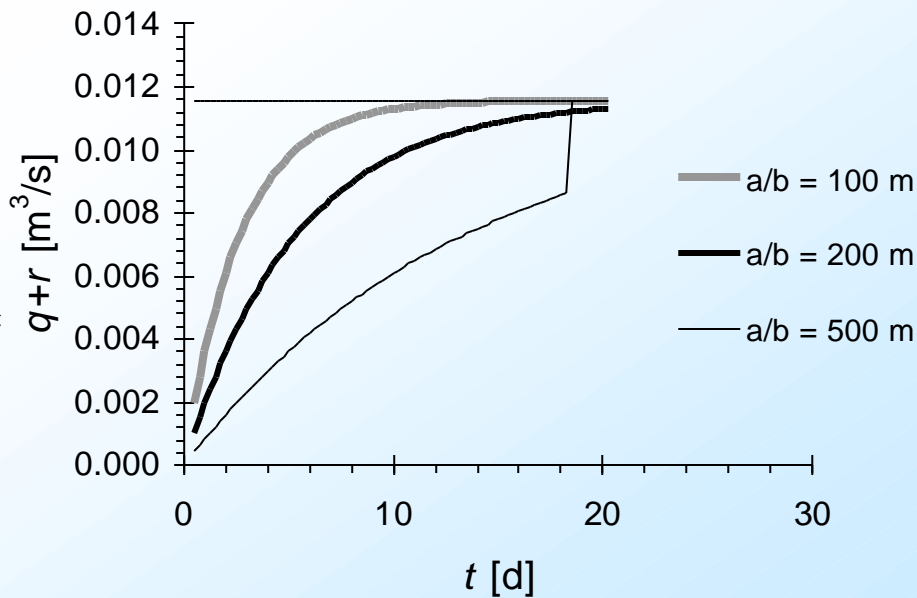
$$w = \frac{ap}{bT \sin \mathbf{q}} \left( 1 - e^{-\frac{bK \sin \mathbf{q}_t}{a}} \right)$$

$$w = \begin{cases} \frac{ap}{bT \sin \mathbf{q}} \left( 1 - e^{-\frac{bK \sin \mathbf{q}_t}{a}} \right) & , \text{ se } t \leq -\frac{a}{bK \sin \mathbf{q}} \ln \left( 1 - \frac{bT \sin \mathbf{q}}{ap} \right) \\ 1 & , \text{ se } t > -\frac{a}{bK \sin \mathbf{q}} \ln \left( 1 - \frac{bT \sin \mathbf{q}}{ap} \right) \end{cases}$$

se  $ap(bT \sin \mathbf{q})^{-1} \leq 1$   
se  $ap(bT \sin \mathbf{q})^{-1} > 1$



pendenza: 35 °, area drenata: 0.01 Km<sup>2</sup>,  
 trasmissività: 65 mq/d, spessore di coltre: 1.00 m,  
 tasso di pioggia: 100 mm/d





# Soglia pluviale di instabilità del pendio

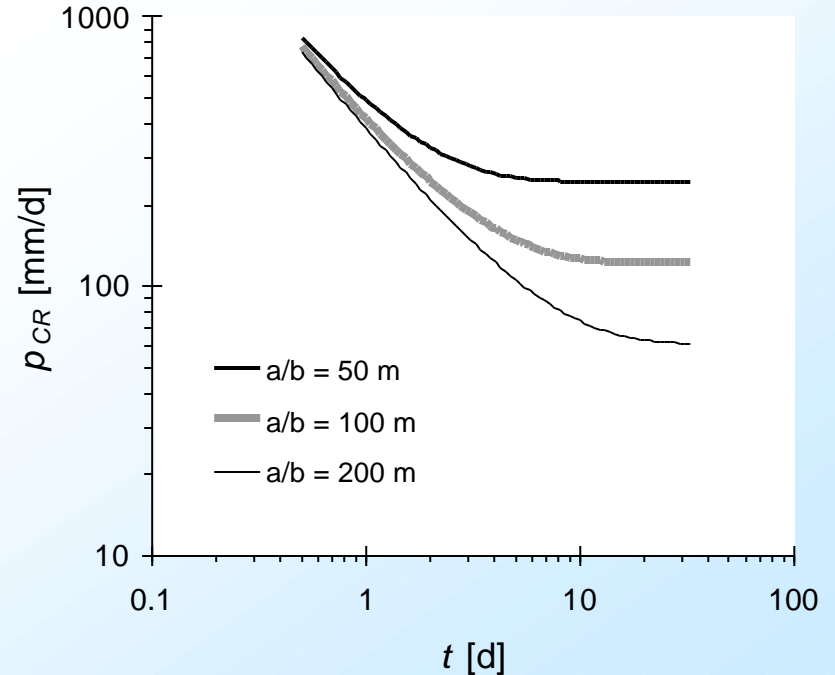
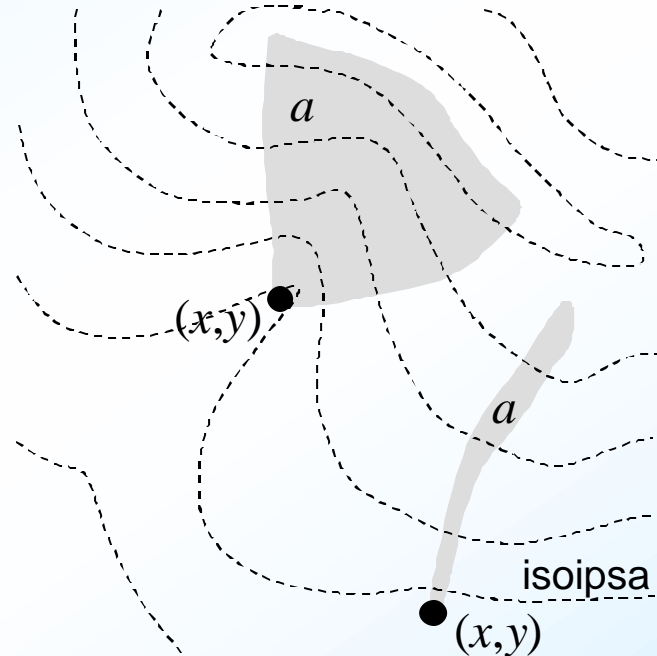
$w$   
contenuto  
idrico

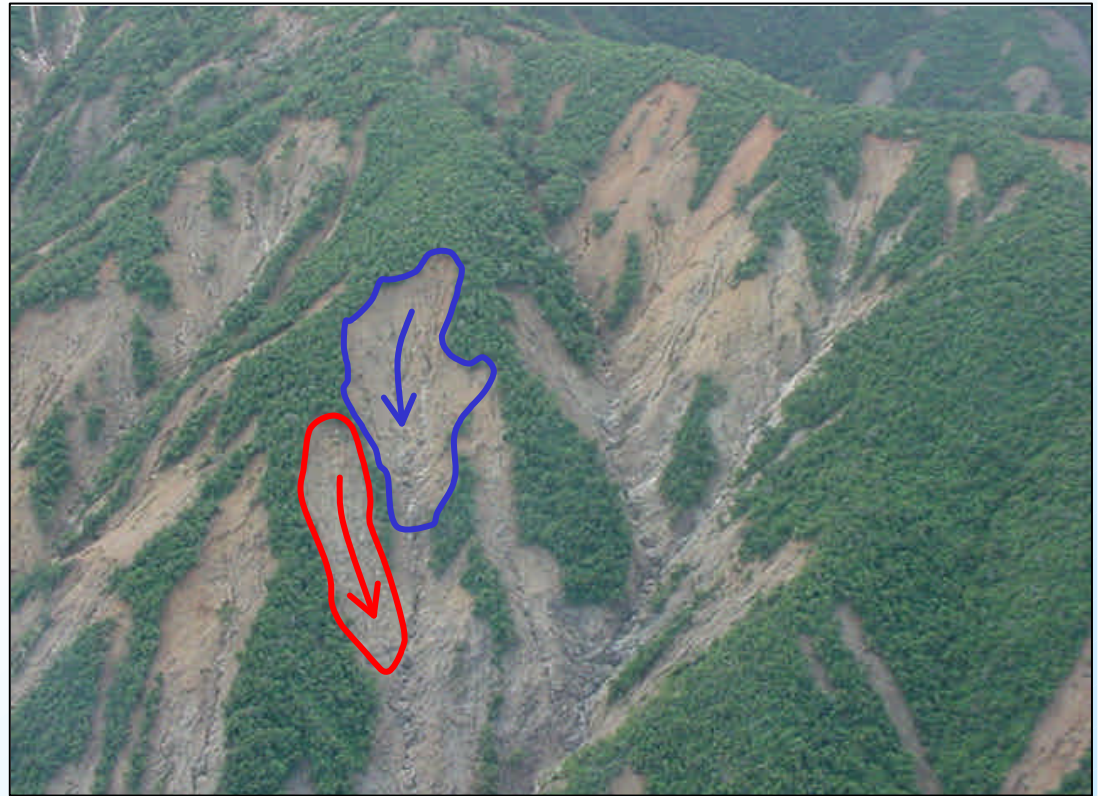
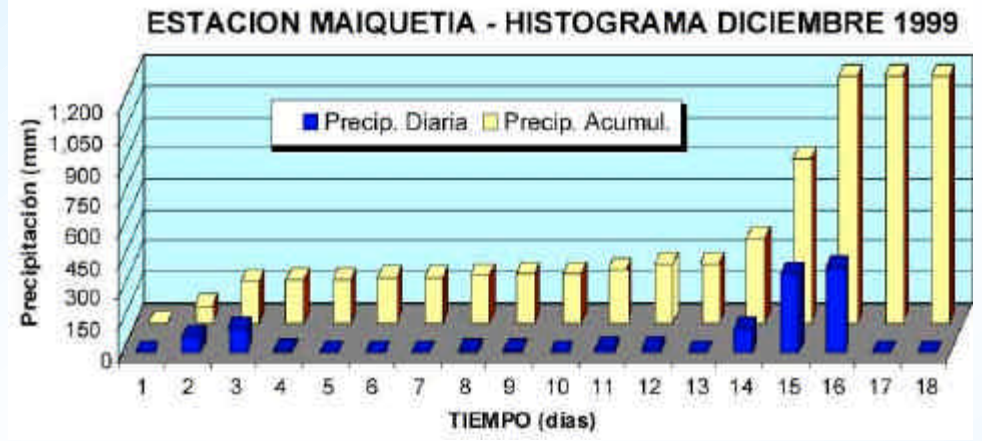
$$\frac{ap}{bT \sin q} \left( 1 - e^{-\frac{bK \sin q}{a} t} \right) = \frac{r_s}{r_w} \left( 1 - \frac{\tan q}{\tan f} \right)$$

$w$   
condizione  
di stabilità

$$p_{CR}(t) = \frac{T \frac{b}{a} \sin q \frac{r_s}{r_w} \left( 1 - \frac{\tan q}{\tan f} \right)}{1 - e^{-\frac{bK \sin q}{a} t}}$$

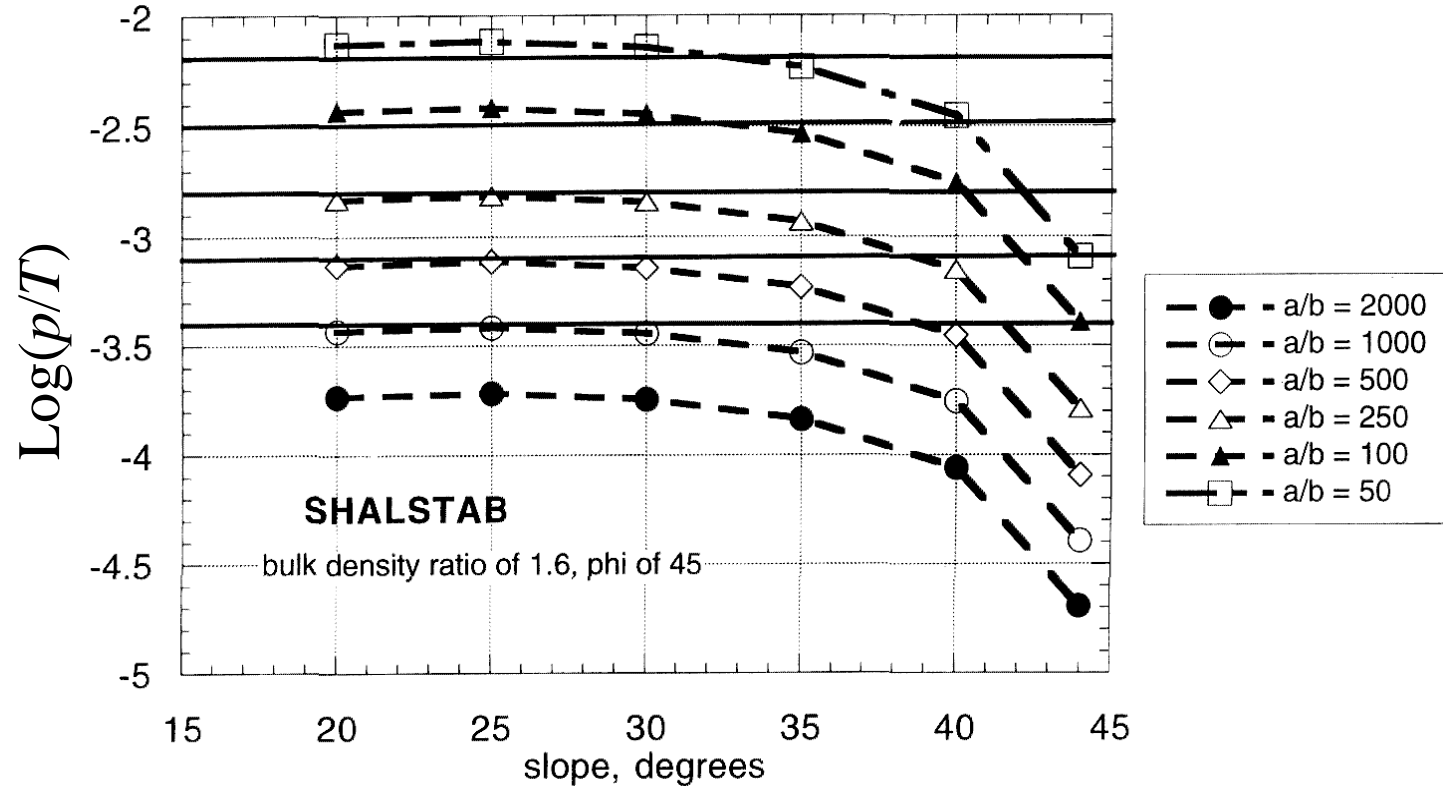
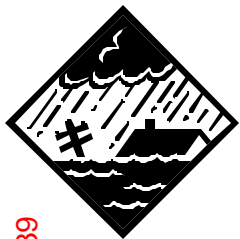
pendenza: 35°, angolo d'attrito: 42°, rapporto di densità: 1.6, spessore di coltre: 1.00 m, trasmissività: 60 mq/d



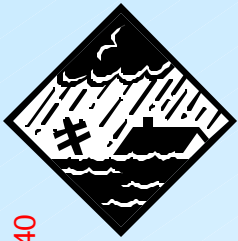


**Venezuela Flash-flood and  
Landslide Disaster,  
December 1999**

Source: U.S. Geological Survey



da Montgomery & Dietrich (1994)



# Scala temporale di modellazione dei versanti per franamento superficiale

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{CR}(t) = T \frac{b}{a} \sin \mathbf{q} \frac{\mathbf{r}_s}{\mathbf{r}_w} \left( 1 - \frac{\tan \mathbf{q}}{\tan \mathbf{f}} \right) \frac{t}{1 - e^{-\frac{bK \sin \mathbf{q}}{a} t}} \\ P_F(t) = m_1 x_F t^n \end{array} \right.$$

soglia pluviale d'innesco

pendenza: 35 °, angolo d'attrito: 42 °, rapporto di densità: 1.6, spessore di coltre: 1.00 m, trasmissività: 60 mq/d

LSPP Scala Invariante

La soluzione è data dal valore di  $F$  per cui  $P_F(t) = P_{CR}(t)$  per  $t = t_{CR}$ , essendo  $P_F(t) < P_{CR}(t)$  per ogni  $t \neq t_{CR}$

Poichè  $\partial^2 P_{CR} / \partial t^2 > 0$  e  $\partial^2 P_F / \partial t^2 < 0$ , la soluzione è univoca e il valore di durata  $t_{CR}$  assume il significato di durata critica ai fini dell'innesco dei fenomeni di franamento superficiale

