



ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ" – ESALQ/USP  
LEB 1440 – HIDROLOGIA E DRENAGEM



# PRECIPITAÇÕES

Prof. Dr. Fernando Campos Mendonça  
Doutoranda: Elizabeth Lima Carnevskis

# Haikai

*Toda chuva, à luz da Ciência,  
Tem altura, intensidade, duração e frequência.*

# Precipitações Intensas - Caracterização



# Eventos Extremos - Microexplosão



# Altura Precipitada (h, mm)

- $h = \text{volume de \u00e1gua} / \text{\u00e1rea da boca do coletor}$
- $1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$



# Duração (t, min ou h)

- Evento como um todo
- Período específico de interesse (fração do todo)
- Importância:
  - Calcular intensidade da chuva ( $i$ , mm/h)
  - Calcular escoamento superficial ( $Q_{sup}$ )
  - Calcular vazão de pico de cheias ( $Q_p$ )

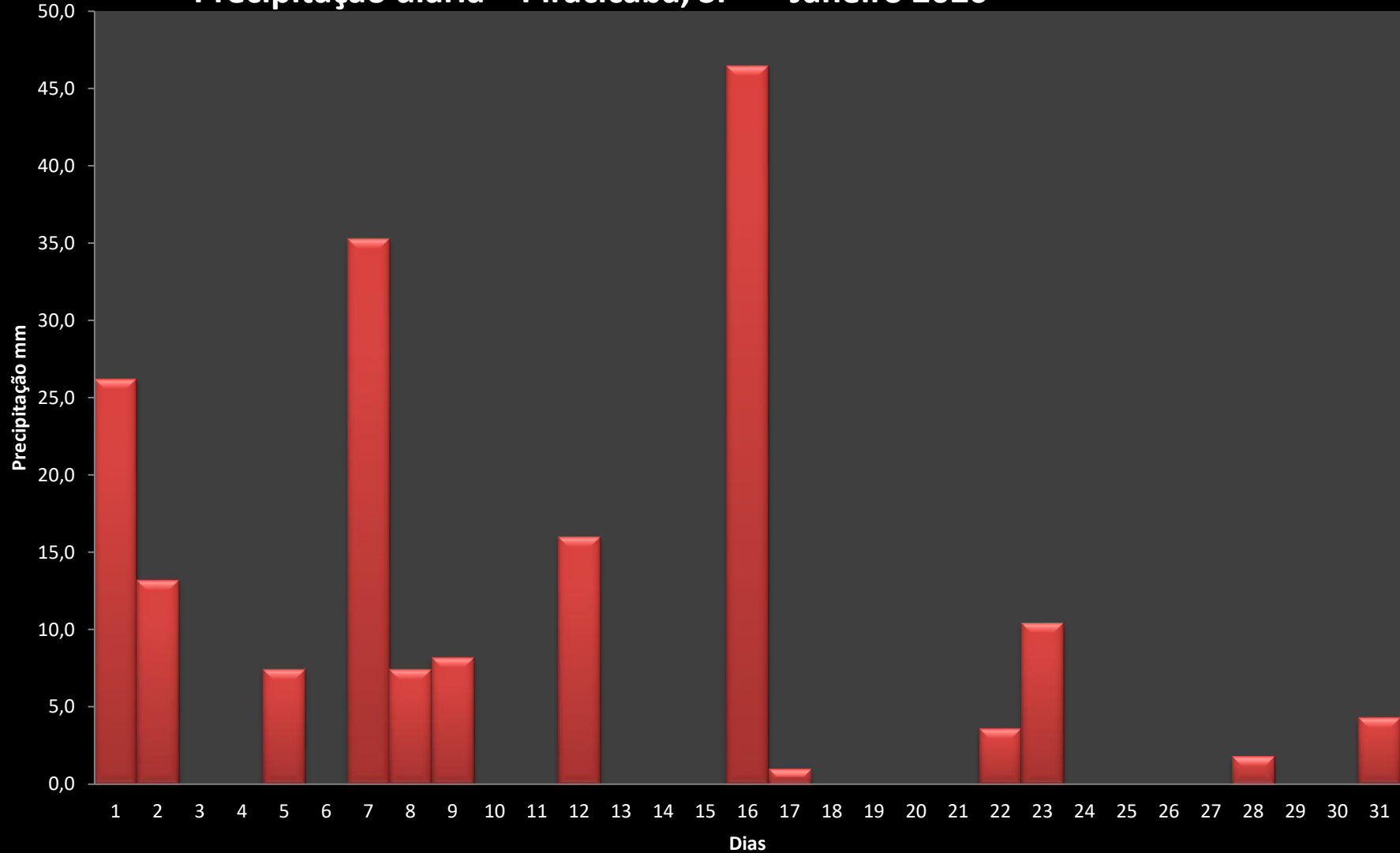
Intensidade média (i, mm/h)

$$i = h/t$$

# Distribuição temporal

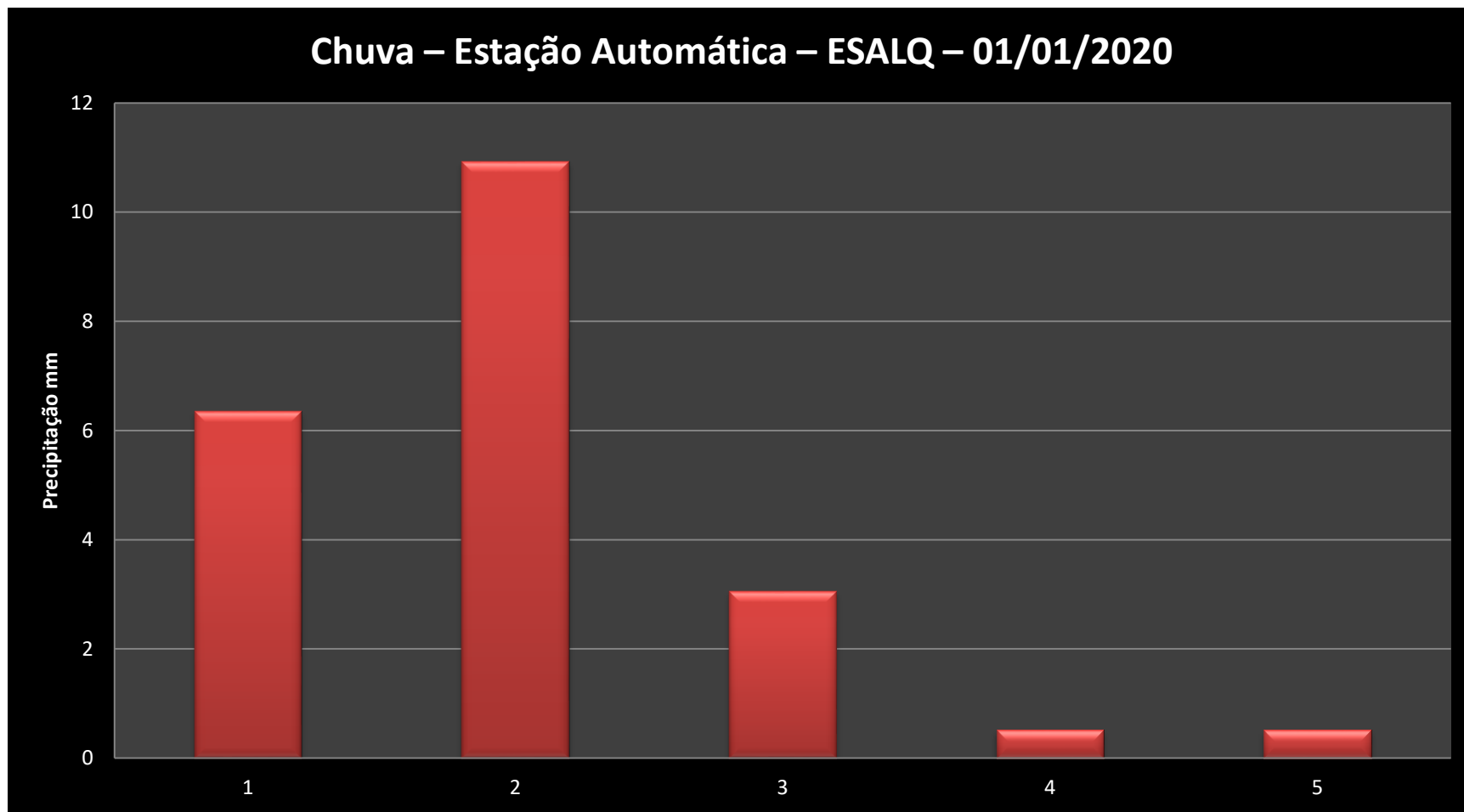
## Diagrama de blocos

Precipitação diária – Piracicaba, SP – Janeiro 2020

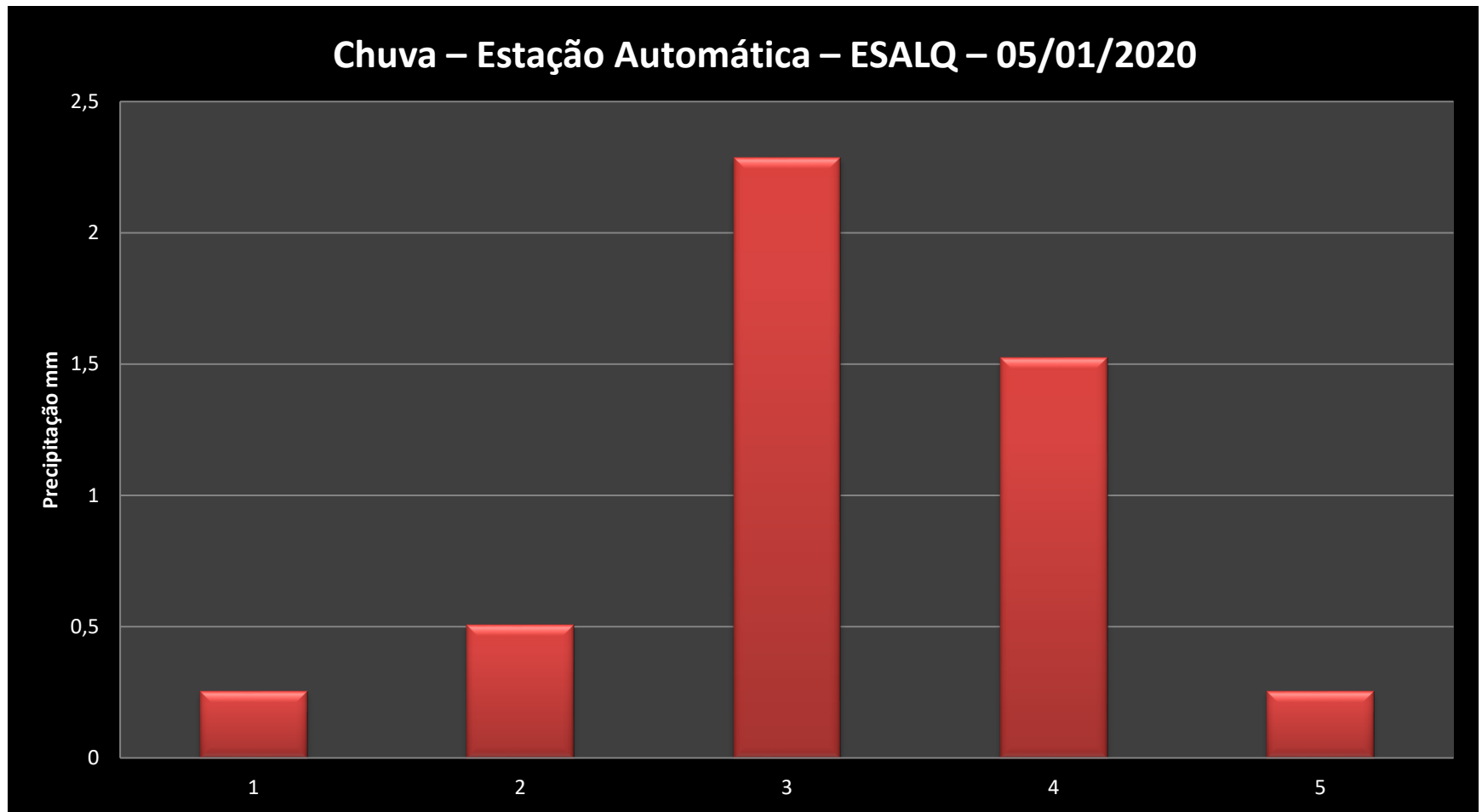




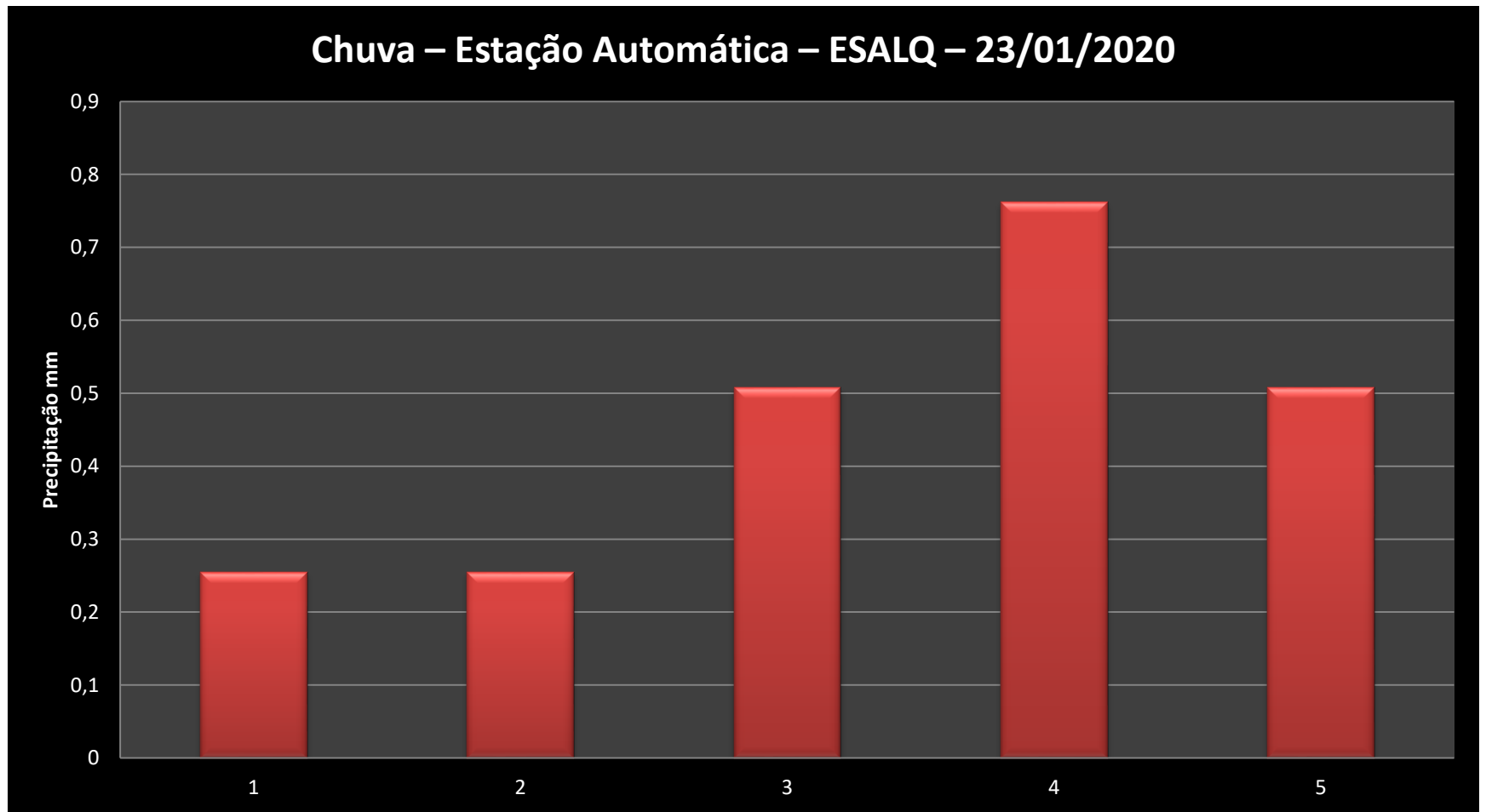
# Exemplos: Chuva Adiantada



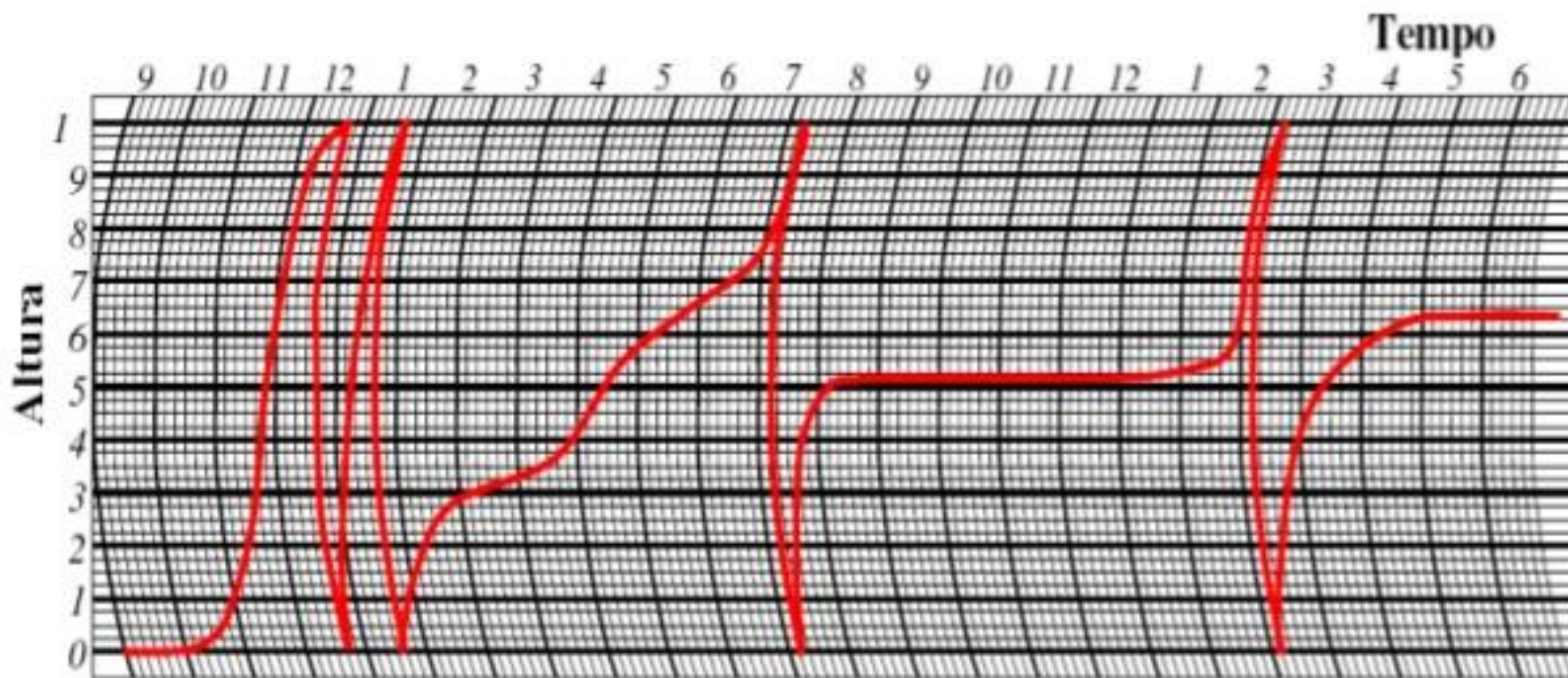
# Exemplos: Chuva Intermediária



# Exemplos: Chuva Atrasada



# Exemplo: Pluviograma e Diagrama de Blocos



# Exemplo: Pluviograma e Diagrama de Blocos

# Chuva

## Distribuição espacial

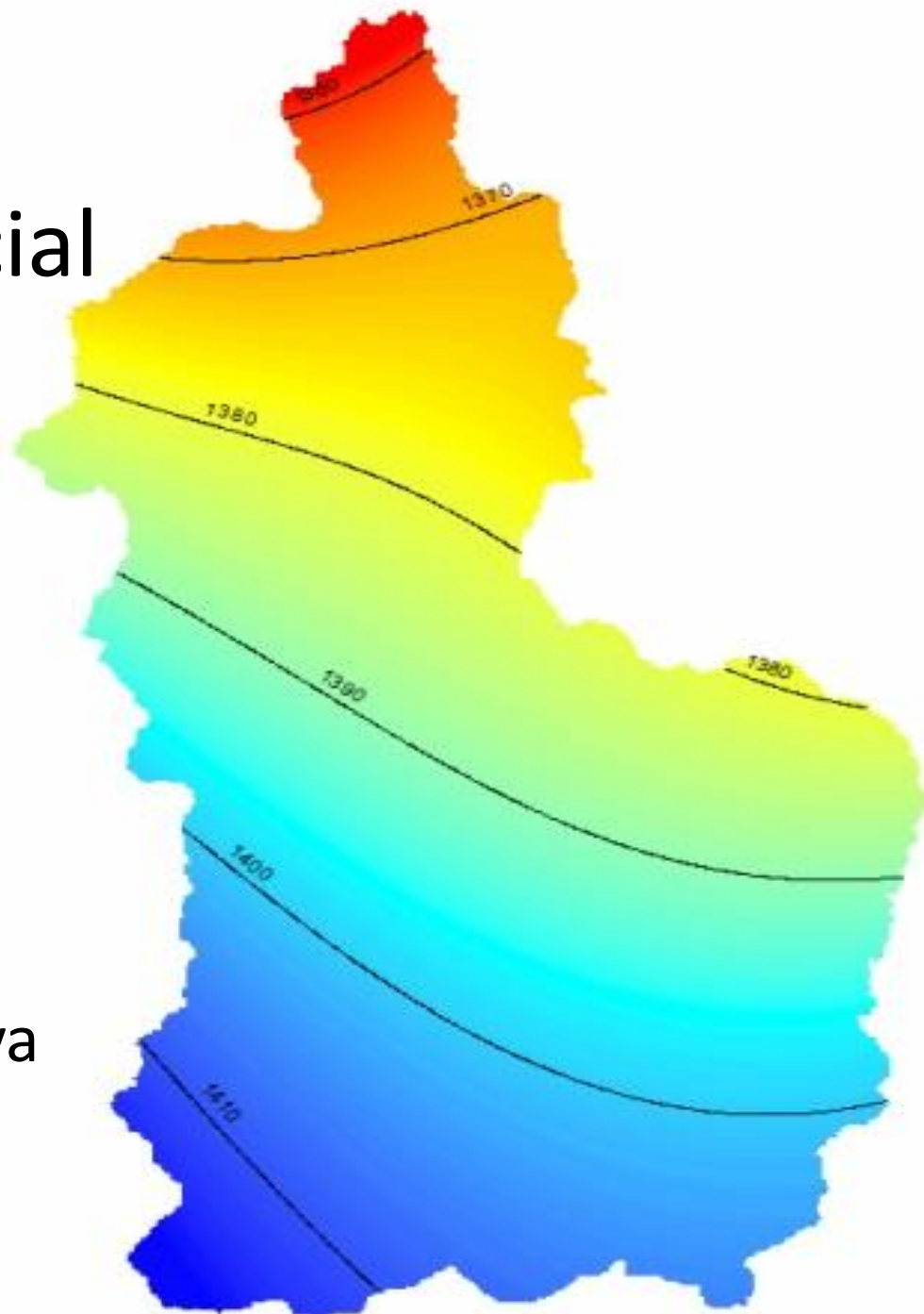
Exemplo: área plana  
296 km<sup>2</sup>

### Isoietas

Iso: igual

letos: chuva

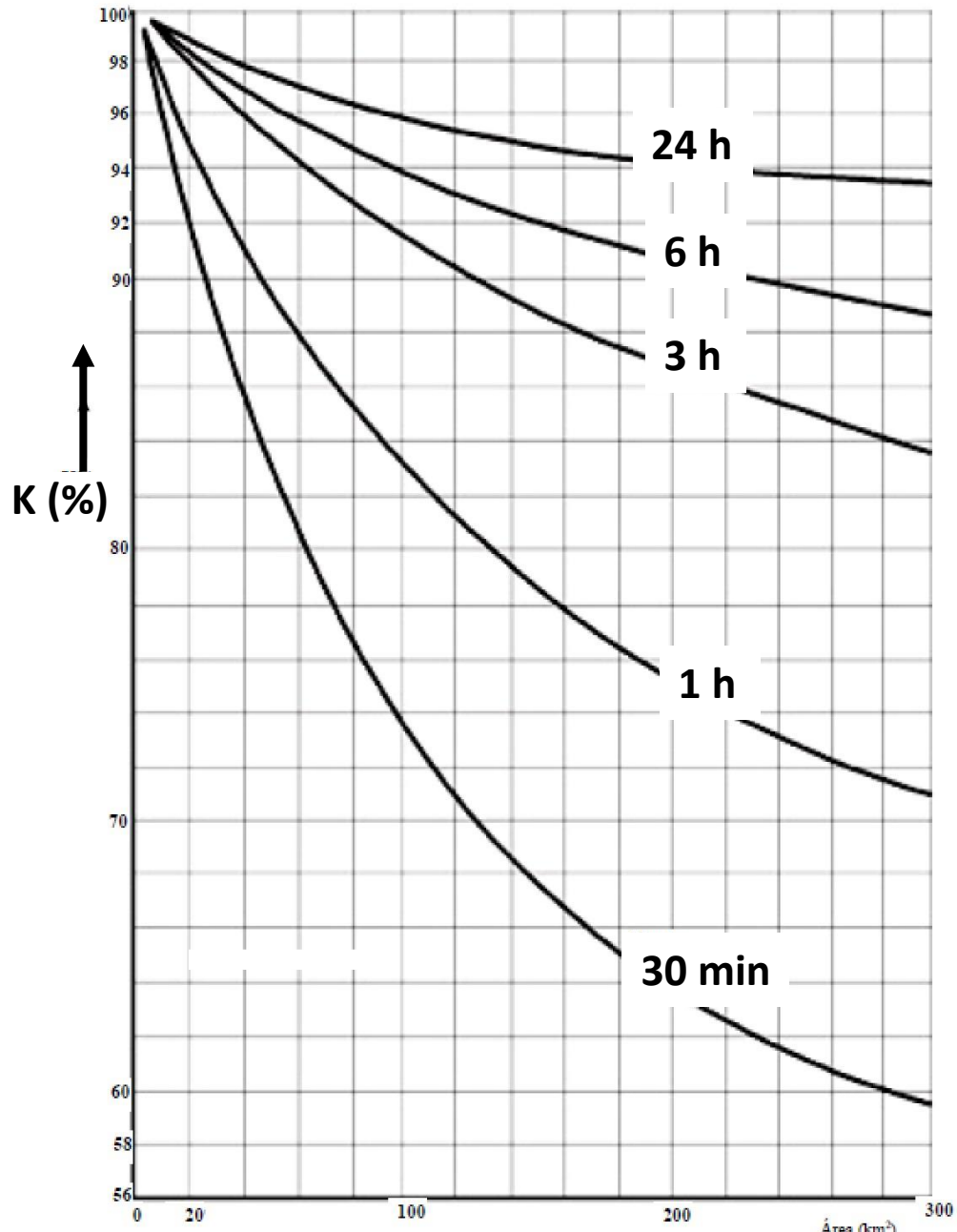
(mesma h, mm)



# Distribuição espacial da chuva

- Áreas pequenas ( $\leq 2 \text{ km}^2$ )
  - Despreza-se a distribuição espacial da chuva
  - Assumir  $h_{\text{proj}} = h_{\text{epicentro}}$
- Áreas grandes ( $> 2 \text{ km}^2$ )
  - Considerar a distribuição espacial da chuva
  - $h_{\text{proj}} = h_{\text{epicentro}} \times K$ 
    - $K$  – fator ou fração de abatimento da chuva (determinação gráfica)

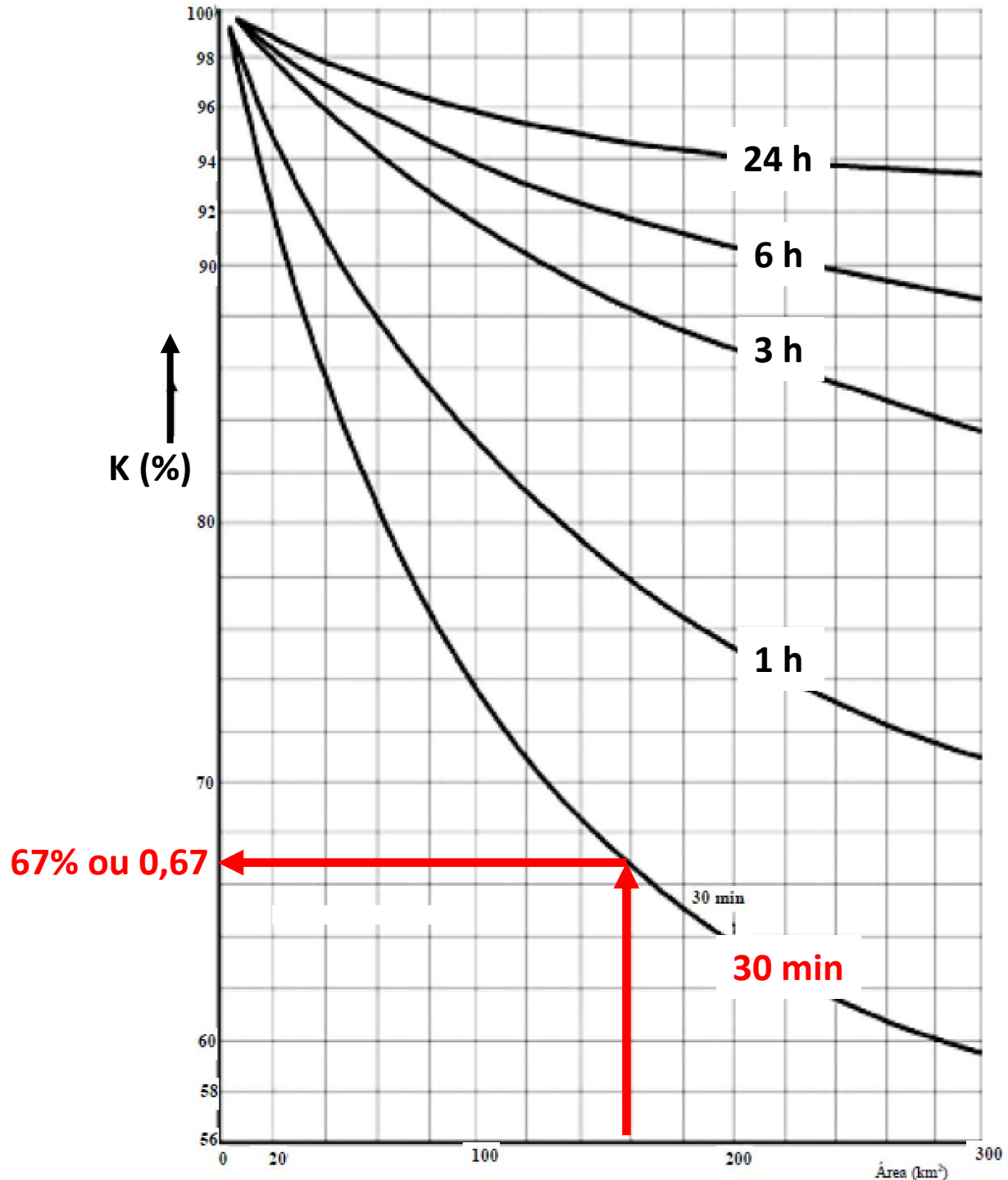
# Coeficiente K – Redução de $h_{proj}$





# Coeficiente K

Redução de  $h_{proj}$

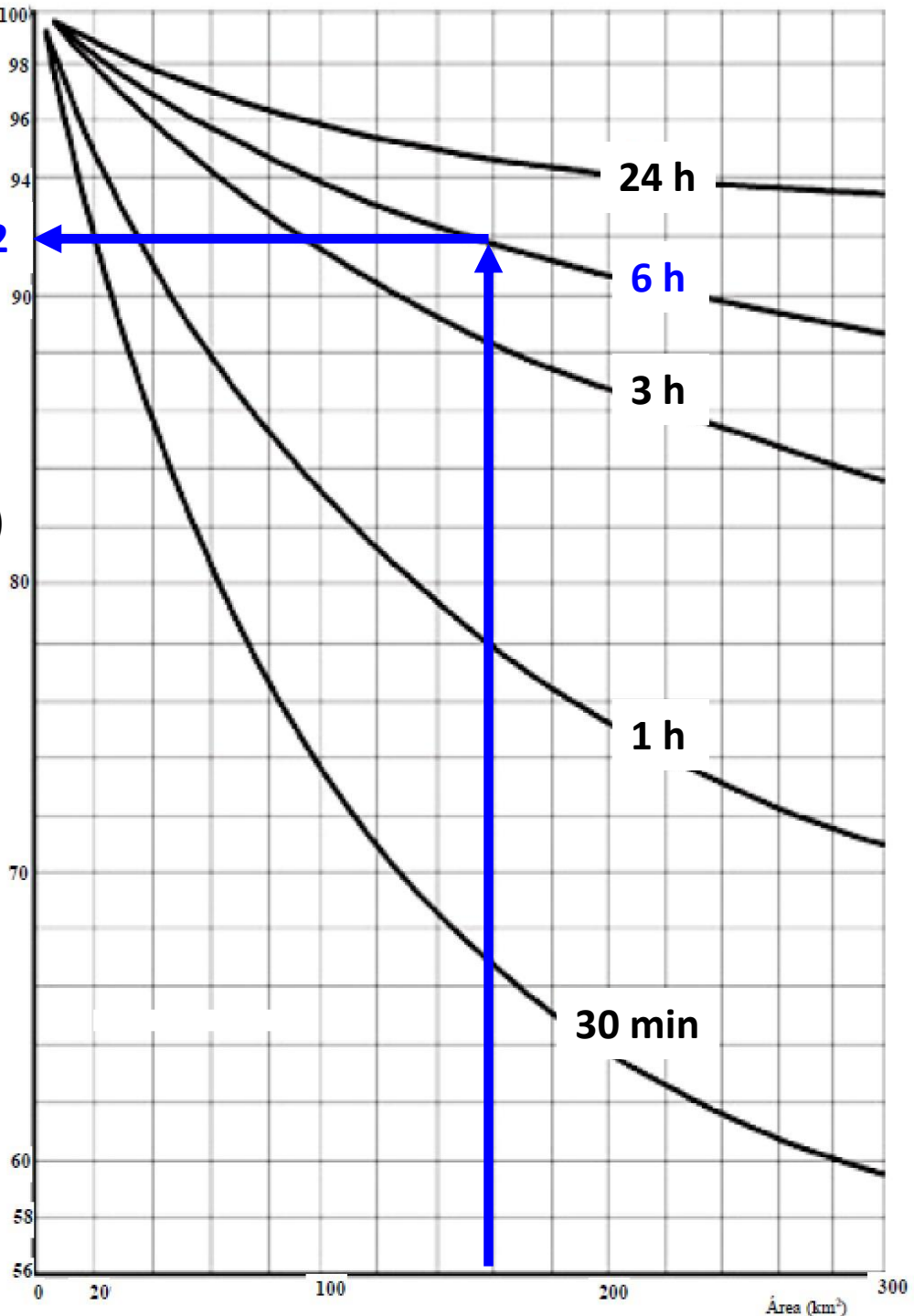


# Coeficiente K

Redução de  $h_{proj}$

92% ou 0,92

K (%)



# Probabilidade de excedência (P)

## Período de retorno (T)

- Pressuposição
  - Clima não está mudando (na escala de tempo considerada)
  - Eventos passados → mesma probabilidade de ocorrência futura
- Período de retorno (T)
  - Intervalo de tempo (geralmente em anos) em que se espera que o evento extremo seja igualado ou superado ao menos uma vez

# Probabilidade de excedência (P) e Período de retorno (T)

$$P = m/n$$

$$T = 1/P$$

P - probabilidade de ocorrência de evento igual ou superior ( $\geq$ )

m – nº de ordem do evento na série de dados

n - nº de dados da série do evento

T – período de retorno do evento (anos)

# Exemplo

- Obtenção da chuva máxima de 24 horas com período de retorno de 5 anos ( $T = 5$ ).

Ano	$h_{24h}$	$h_{24h}$ Ordenados	m	$P = m/n$	$P^* = m/n+1$	T	$T^*$
1960	50						
1961	40						
1962	30						
1963	60						
1964	80						
1965	45						
1966	70						
1967	20						
1968	10						
1969	65						

# Ppt máx (24 h) – Dados ordenados

Ordem: do mais raro ao mais comum

Ano	$h_{24h}$	$h_{24h}$ Ordenados	m	$P = m/n$	$P^* = m/n+1$	T	T*
1960	50	80					
1961	40	70					
1962	30	65					
1963	60	60					
1964	80	50					
1965	45	45					
1966	70	40					
1967	20	30					
1968	10	20					
1969	65	10					

# Ppt máx (24 h)

Nº de ordem (m) e Total de dados (n)

Ano	$h_{24h}$	$h_{24h}$ Ordenados	m	$P = m/n$	$P^* = m/n+1$	T	T*
1960	50	80	1				
1961	40	70	2				
1962	30	65	3				
1963	60	60	4				
1964	80	50	5				
1965	45	45	6				
1966	70	40	7				
1967	20	30	8				
1968	10	20	9				
1969	65	10	10				

 n = último valor de m

# Ppt máx (24 h)

Probabilidade de excedência (P)

Ano	$h_{24h}$	$h_{24h}$ Ordenados	m	$P = m/n$	$P^* = (m+1)/n$	T	T*
1960	50	80	1	10%			
1961	40	70	2	20%			
1962	30	65	3	30%			
1963	60	60	4	40%			
1964	80	50	5	50%			
1965	45	45	6	60%			
1966	70	40	7	70%			
1967	20	30	8	80%			
1968	10	20	9	90%			
1969	65	10	10	100%			



# Ppt máx (24 h)

## Período de Retorno (T)

Ano	$h_{24h}$	$h_{24h}$ Ordenados	m	$P = m/n$	$P^* = m/n+1$	T	T*
1960	50	80	1	10%		10	
1961	40	70	2	20%		5	
1962	30	65	3	30%		3,3	
1963	60	60	4	40%		2,5	
1964	80	50	5	50%		2	
1965	45	45	6	60%		1,7	
1966	70	40	7	70%		1,4	
1967	20	30	8	80%		1,3	
1968	10	20	9	90%		1,1	
1969	65	10	10	100%		1	

# Ppt máx (24 h)

## Período de Retorno (T)

Ano	$h_{24h}$	$h_{24h}$ Ordenados	m	$P = m/n$	$P^* = m/n+1$	$T = 1/P$	$T^*$
1960	50	80	1	10%		10	
1961	40	70	2	20%		5	
1962	30	65	3	30%		3,3	
1963	60	60	4	40%		2,5	
1964	80	50	5	50%		2	
1965	45	45	6	60%		1,7	
1966	70	40	7	70%		1,4	
1967	20	30	8	80%		1,3	
1968	10	20	9	90%		1,1	
1969	65	10	10	100%		1	

Constrangimento hidrológico: Não há probabilidade de 100%

# Ppt máx (24 h)

Probabilidade de excedência ( $P^*$  - Método de Kimball)

Ano	$h_{24h}$	$h_{24h}$ Ordenados	m	$P = m/n$	$P^* = m/n+1$	$T = 1/P$	$T^*$
1960	50	80	1	10%	9,09%	10	
1961	40	70	2	20%	18,18%	5	
1962	30	65	3	30%	27,27%	3,3	
1963	60	60	4	40%	36,36%	2,5	
1964	80	50	5	50%	45,45%	2	
1965	45	45	6	60%	54,55%	1,7	
1966	70	40	7	70%	63,64%	1,4	
1967	20	30	8	80%	72,73%	1,3	
1968	10	20	9	90%	81,82%	1,1	
1969	65	10	10	100%	90,91%	1	

$P^*$  - probabilidade de excedência calculada com o Método de Kimball

# Ppt máx (24 h)

## Período de Retorno ( $T^*$ - Método de Kimball)

Ano	$h_{24h}$	$h_{24h}$ Ordenados	m	$P = m/n$	$P^* = m/n+1$	$T = 1/P$	$T^* = 1/P^*$
1960	50	80	1	10%	9,09%	10	11
1961	40	70	2	20%	18,18%	5	5,5
1962	30	65	3	30%	27,27%	3,3	3,7
1963	60	60	4	40%	36,36%	2,5	2,8
1964	80	50	5	50%	45,45%	2	2,2
1965	45	45	6	60%	54,55%	1,7	1,8
1966	70	40	7	70%	63,64%	1,4	1,6
1967	20	30	8	80%	72,73%	1,3	1,4
1968	10	20	9	90%	81,82%	1,1	1,2
1969	65	10	10	100%	90,91%	1	1,1

$P^*$  - probabilidade de excedência calculada com o Método de Kimball

$T^*$  - período de retorno calculado a partir de  $P^*$

# Ppt máx (24 h)

Período de Retorno (T - Método de Kimball)

Ano	$h_{24h}$	$h_{24h}$ Ordenados	m	$P = m/n+1$	$T = 1/P$
1960	50	80	1	9,09%	11
1961	40	70	2	18,18%	5,5
1962	30	65	3	27,27%	3,7
1963	60	60	4	36,36%	2,8
1964	80	50	5	45,45%	2,2
1965	45	45	6	54,55%	1,8
1966	70	40	7	63,64%	1,6
1967	20	30	8	72,73%	1,4
1968	10	20	9	81,82%	1,2
1969	65	10	10	90,91%	1,1

$h = ?$

$T = 5$

# Ppt máx (24 h)

T = 5 anos

- Interpolação

T = 5,5 anos

T = 5 anos

T = 3,7 anos

$\Delta T = 1,8$  anos

$\Delta T = 1,3$  anos

$h_{(5,5)} = 70$  mm

$h_{(5)} = ?$

$h_{(3,7)} = 65$  mm

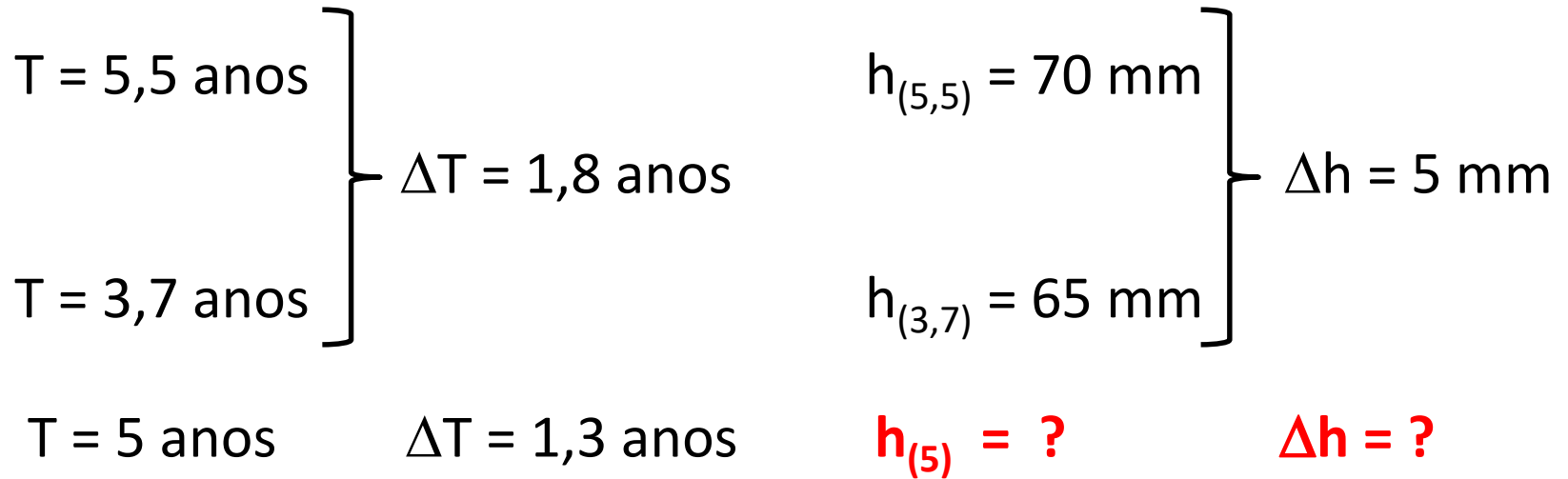
$\Delta h = 5$  mm

$\Delta h = ?$

# Ppt máx (24 h)

T = 5 anos

- Interpolação

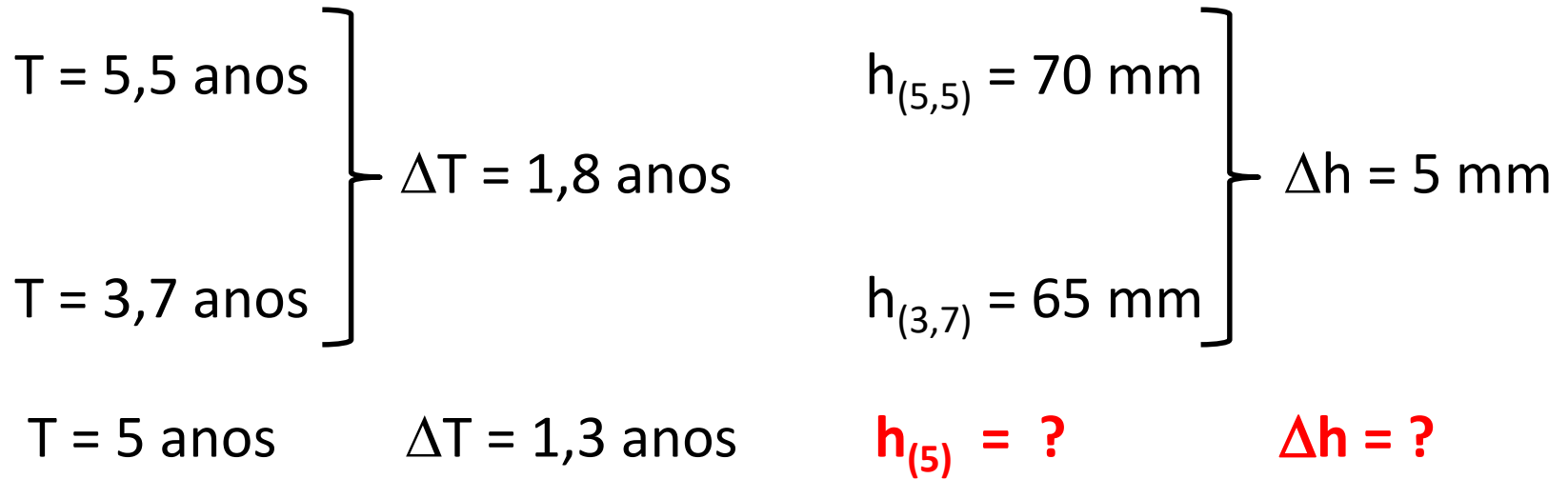


$\Delta T$	$\Delta h$
1,8	5

# Ppt máx (24 h)

T = 5 anos

- Interpolação



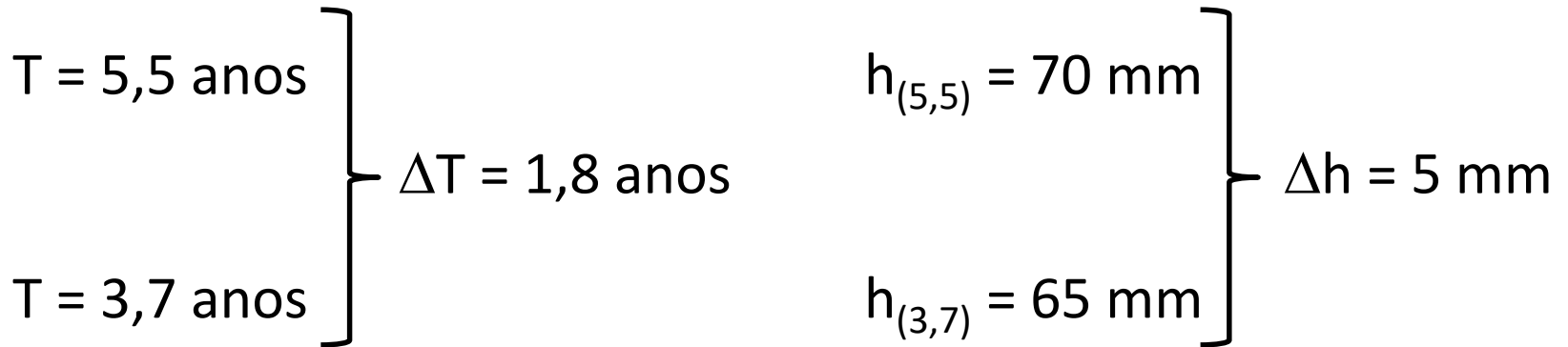
$\Delta T$	$\Delta h$
1,8	5
1,3	x



# Ppt máx (24 h)

T = 5 anos

- Interpolação



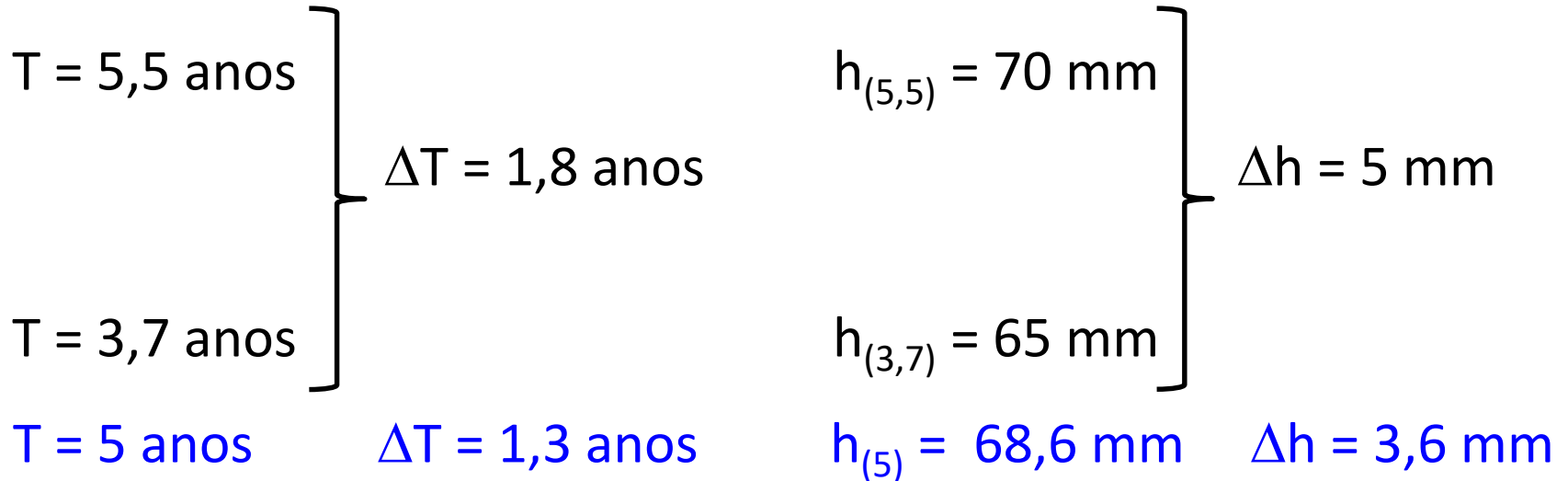
T = 5 anos       $\Delta T = 1,3$  anos       $h_{(5)} = ?$        $\Delta h = ?$

$\Delta T$	$\Delta h$
1,8	5
1,3	x
$\Delta h_{(5)} = 3,6$	

# Ppt máx (24 h)

T = 5 anos

- Interpolação



$\Delta T$	$\Delta h$
1,8	5
1,3	x
$\Delta h_{(5)} = 3,6$	
$h_{(5)} = 65 + 3,6 = 68,6$ mm	

# Período de retorno (T)

## Estruturas hidráulicas de controle

ESTRUTURA	T (anos)
1 – Galeria de águas pluviais	2 a 10
2 – Terraço agrícola	5 a 10
3 – Retificação de rios em zonas rurais	20 a 100
4 – Cota de casa de bombas (irrigação)	25 a 100
5 – Bueiros e vertedores (pequenas barragens)	100
6 – Vertedores de barragens (porte médio)	1.000
7 – Vertedores de grandes barragens	10.000
8 – Vertedores de barragens muito grandes	Ppt máxima possível (PMP)

# Chuvas máximas com $t \leq 24$ h

A **chuva** que gera a **máxima vazão** para um dado **período de retorno** tem **duração igual** à do **tempo de concentração**.

Cada obra hidráulica tem características distintas de concentração de água.

# Chuvas máximas com $t \leq 24$ h

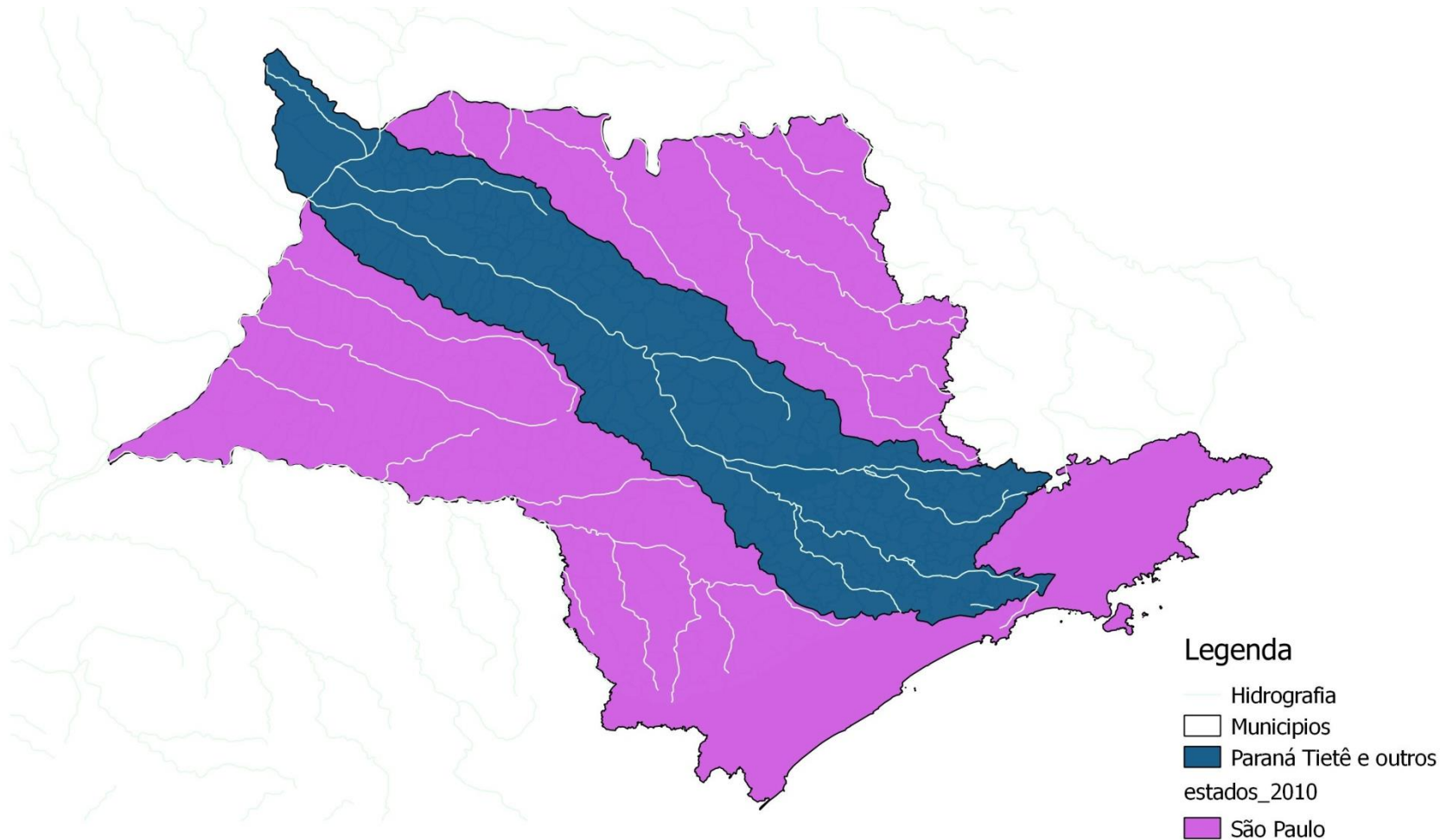
Tempo de concentração:

Tempo necessário para que **toda a área** (BH ou área de contribuição) forneça água para o escoamento superficial.

Tempo em que ocorre a **vazão de pico** ( $Q_p$ )

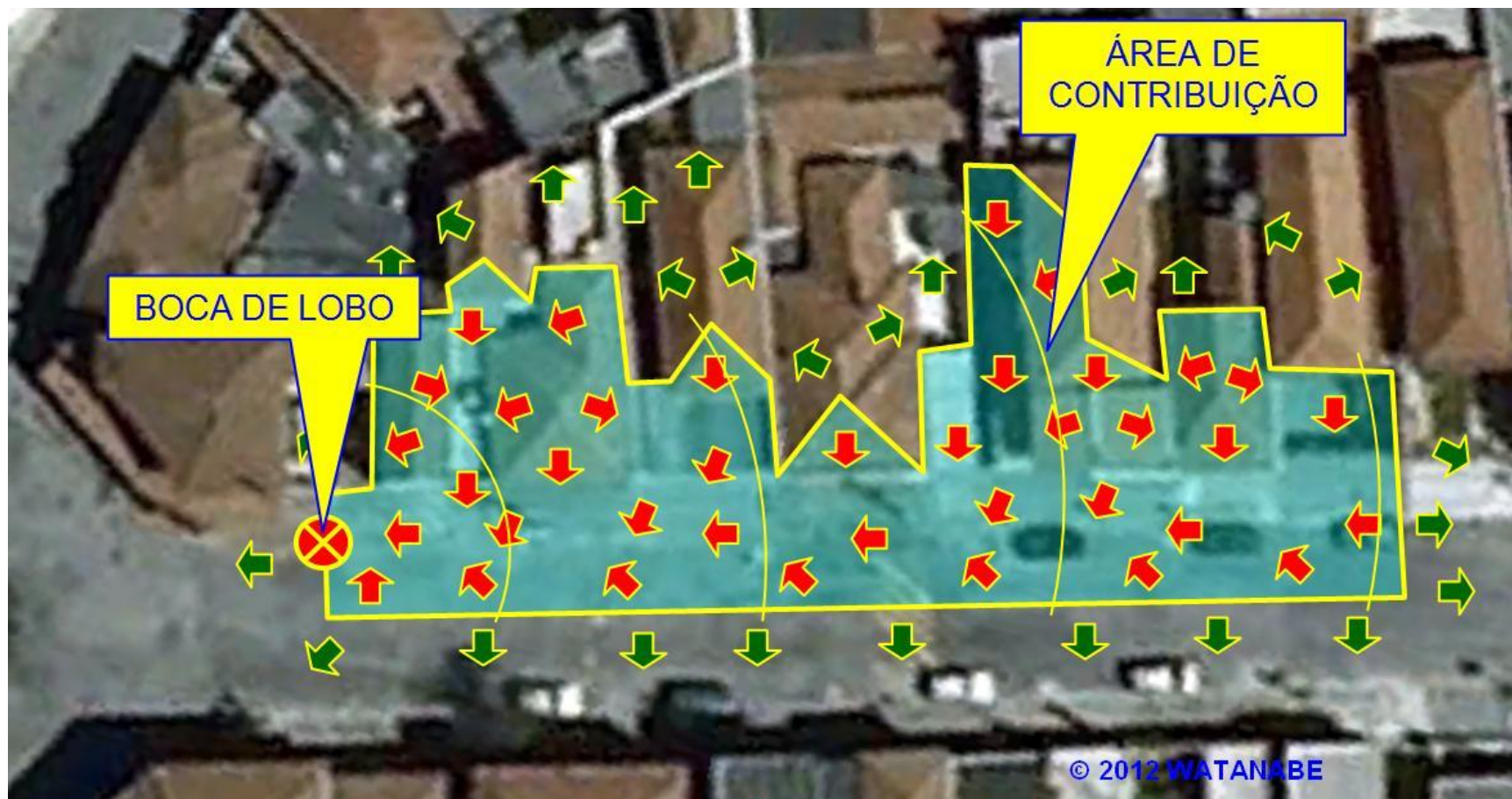
# Área de contribuição grande

## BH Rio Tietê



# Área de contribuição pequena

## Bueiro de rua



# Conclusão

**Dimensionamento** de obras hidráulicas

Determinar a **chuva de projeto**:

Chuva de Projeto = **Chuva máxima**

**Duração (t)**

**Período de retorno (T)**



# Fontes de dados de precipitações intensas no Brasil

- Formas de apresentação
  - Gráficos e tabelas
  - Equações IDF (Intensidade, Duração, Frequência)
  - *Softwares*
  - Coeficientes de transformação

# Gráficos e tabelas

Pioneiro:

Eng. Otto Pfasstetter

DNOS

- 98 postos, 14 em SP  
Gráficos (1957)
- Cetesb - SP  
Tabelas (1982)



# Gráficos e tabelas

Duração	Período de retorno (T, anos)					
	2	5	10	25	50	100
	PIRACICABA - SP					
15 min	21	24	27	30	33	35
30 min	30	37	42	48	53	58
1 h	39	48	55	65	73	81
2 h	48	58	66	78	88	98
4 h	57	70	81	96	108	122
8 h	56	83	95	113	128	145
12 h	74	91	104	124	140	168
24 h	87	106	121	144	162	182

# Equações

Otto Pfafstetter:

$$h_{t,T} = T^{\alpha + \frac{\beta}{T^\gamma}} \cdot [a \cdot t + b \cdot \log(1 + c \cdot t)]$$

$h_{i,T}$  – precipitação (mm) correspondente à duração  $t$  e ao período de retorno  $T$

$T$  – período de retorno ( $T$ , anos)

$t$  – duração da precipitação (horas)

$a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$  - constantes de ajuste da equação para cada local

Obs.: é o modelo que gerou a tabela do item anterior.

# Equações IDF

Modelos IDF (Intensidade, Duração e Frequência)

Denardin & Freitas (1982):

$$i = \frac{a \cdot T^b}{(t + c)^d}$$

$i$  – intensidade da precipitação (mm/h)

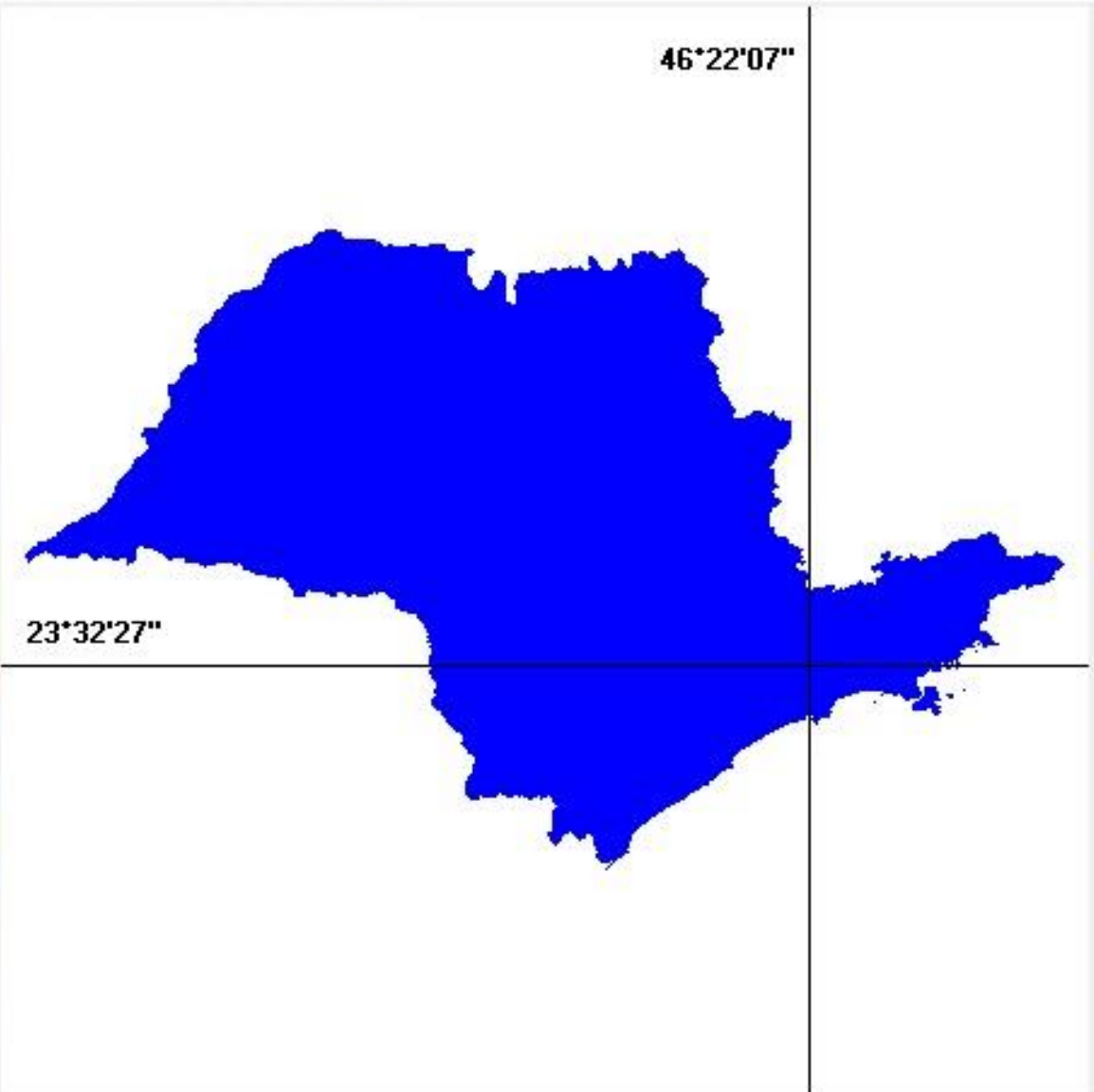
$t$  – duração da precipitação (min)

$T$  – período de retorno (anos)

$a, b, c, d$  – constantes de ajuste da equação para cada local

# Softwares

- Pluvio 2.1
- <http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>
- Uso de equações IDF



Estados :

Estações :

- Barbosa
- Barra Bonita
- Barra do Chapéu (Ápiai)
- Barra dos Pilões (Iporanga)
- Barreiro (Capão Bonito)
- Batatais
- Bauru
- Boituva
- Bonfim (Aparecida)
- Boraceia (Bertinoga)

Localidades :

- Fazenda Velha (Cesário Lange)
- Fernando Prestes
- Fernandópolis
- Fernão
- Ferraz de Vasconcelos**
- Flora Rica
- Floreal
- Floresta do Sul (Presidente Prudente)
- Flórida Paulista
- Florínia

Interpolação

Relatório

Ajuda

Cancelar

Fechar

Latitude :

Longitude :

Calcular

Parâmetros da Equação IDF

K:

a:

b:

c:

# Coeficientes de transformação

$$h_{24\text{ h}} = h_{1\text{ dia}} \times 1,14$$

$$h_{12\text{ h}} = h_{24\text{ h}} \times 0,85$$

$$h_{1\text{ h}} = h_{24\text{ h}} \times 0,42$$

$$h_{30\text{ min}} = h_{1\text{ h}} \times 0,74$$

$$h_{15\text{ min}} = h_{30\text{ min}} \times 0,54$$

$$h_{1\text{ dia}} \times 1,14 \rightarrow h_{24\text{ h}} \times 0,42 \rightarrow h_{1\text{ h}} \times 0,74 \rightarrow h_{30\text{ min}} \times 0,54 \rightarrow h_{15\text{ min}}$$



$$\times 0,85$$



$$h_{12\text{ h}}$$



# Análise de dados pluviométricos

## Ppt média na BH

1) Média Aritmética simples

2) Método de Thiessen

Média ponderada por área de abrangência

# Média Aritmética Simples

# Média Aritmética Simples

- $H_m = (80+105+60+50)/4 = 73,8 \text{ mm}$
- O método negligencia dados fora da BH
- Não considera área de abrangência do posto meteorológico

# Método de Thiessen

Ppt média ponderada por área de influência ( $P_m$ )

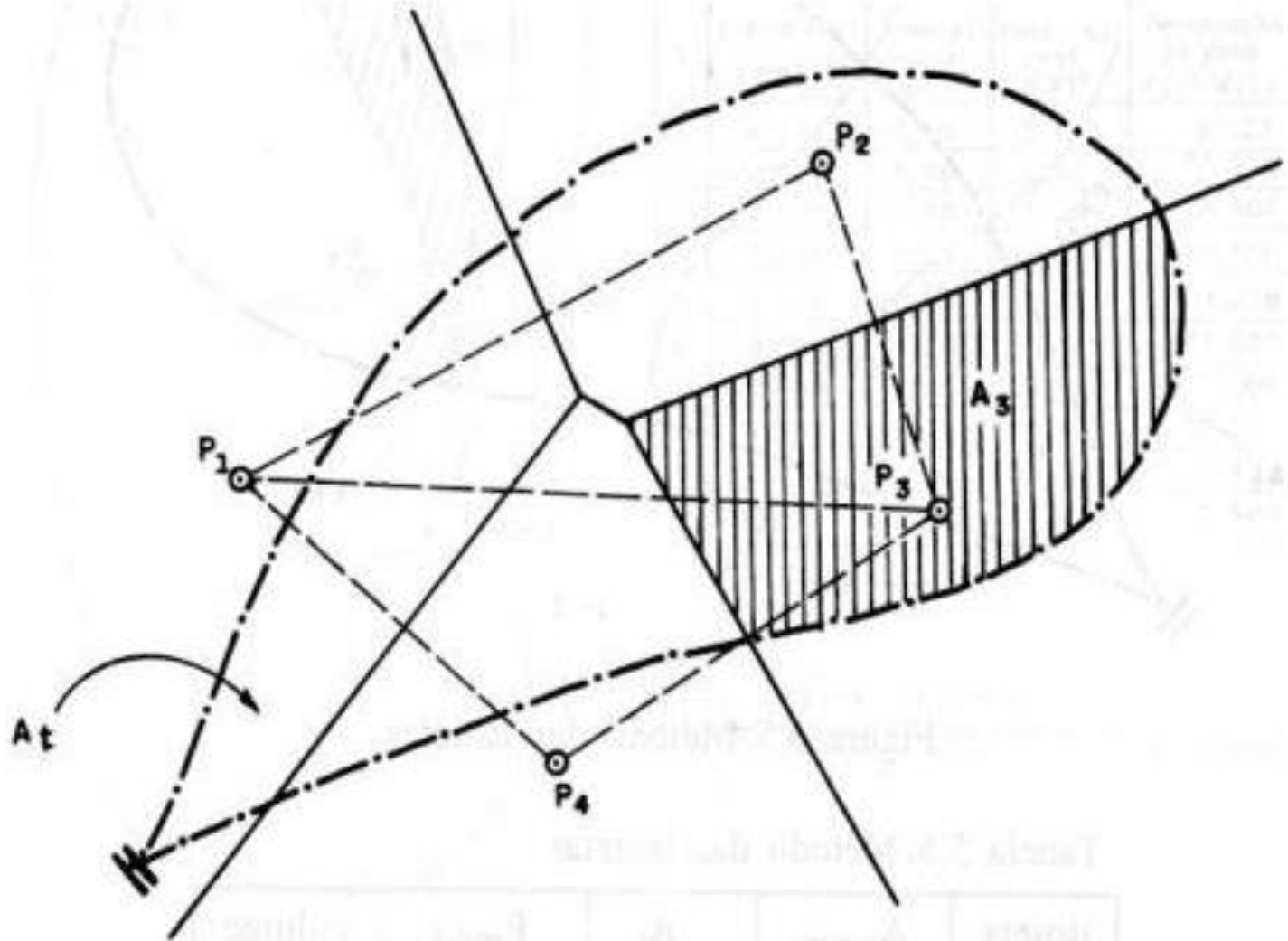
Precipitação medida em cada posto ( $P_i$ )

Determinação da área de influência ( $A_i$ )

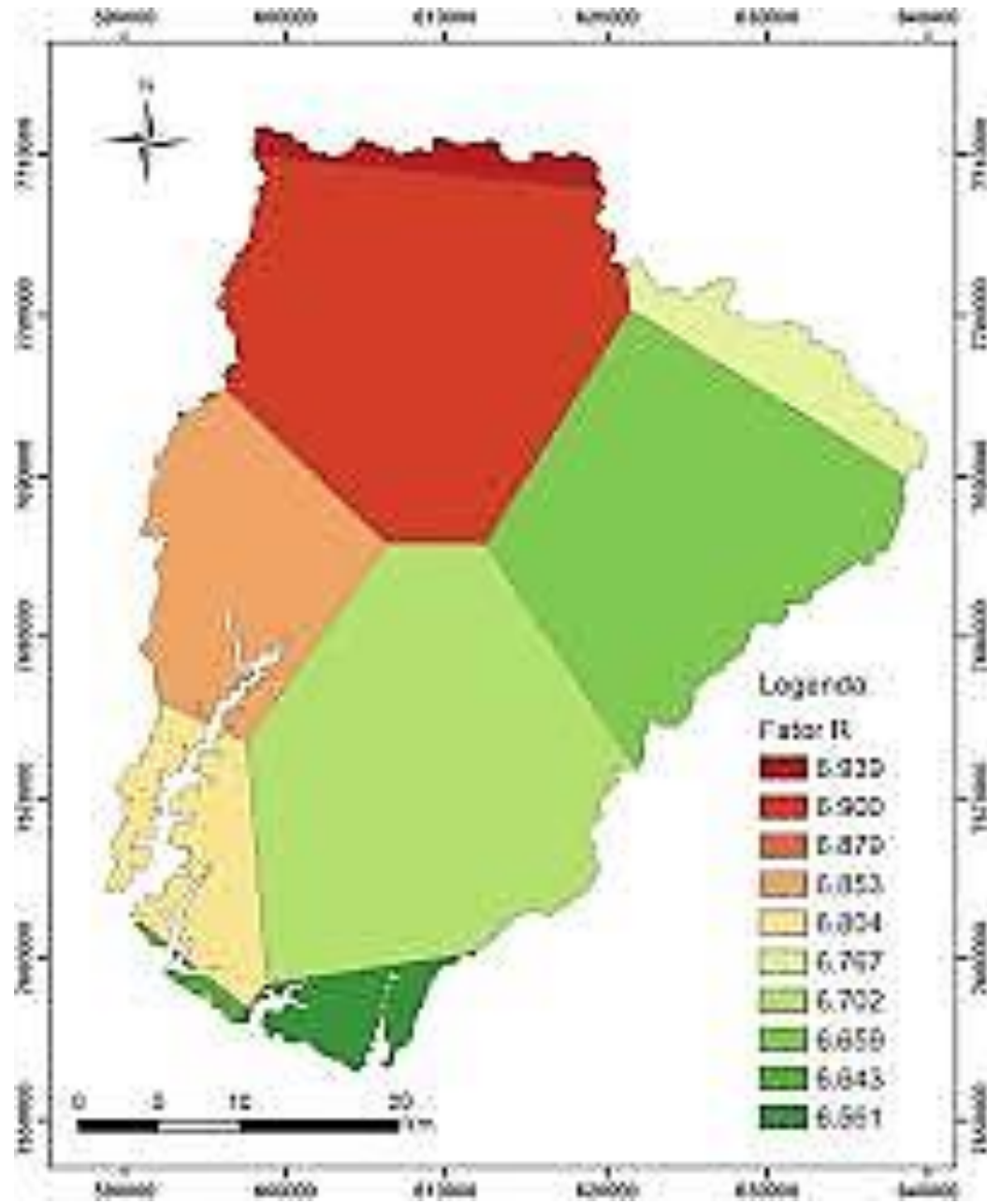
Divisão das áreas de influência

Uso de mediatrizes e circuncentros

# Método de Thiessen



# Método de Thiessen



# Método de Thiessen

## PASSO-A-PASSO

- Identificar postos meteorológicos na BH e no entorno
- Traçar retas pontilhadas entre os postos adjacentes
- Dividir ao meio as retas entre postos adjacentes
- Traçar mediatrizes entre pontos adjacentes
- Unir mediatrizes p/ separar áreas de influência
  - Ponto de encontro = Circuncentro
- Calcular a área de influência de cada posto ( $A_i$ )

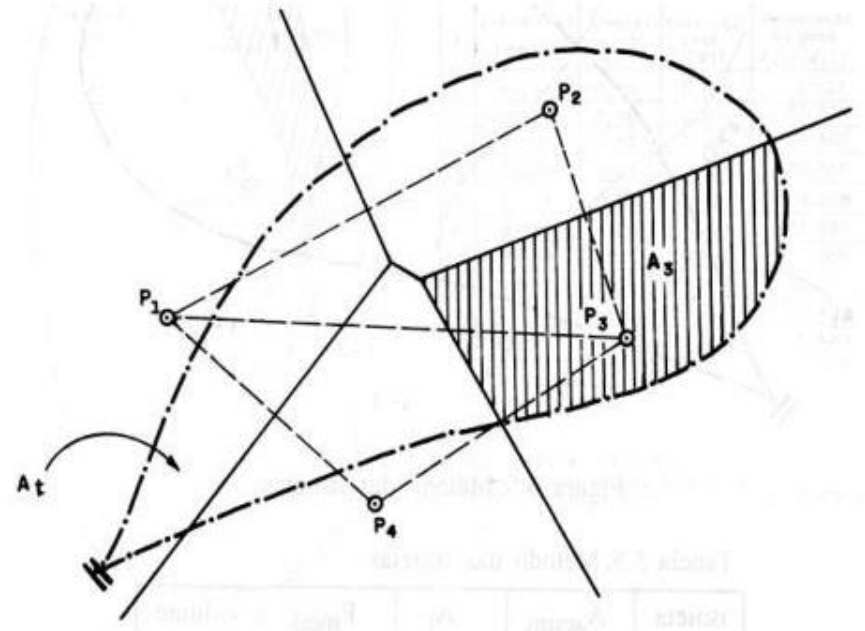
# Método de Thiessen

$$P_m = \frac{\sum A_i P_i}{\sum A_i}$$

$P_m$  é a precipitação média na bacia

$A_i$  é área de influência de cada posto;

$P_i$  é a precipitação de cada posto





# Método de Thiessen

- Esquema de BH e Postos Meteorológicos
- Cálculo de  $P_m$

# Tamanho das séries históricas

Séries históricas curtas “escondem” extremos

- Qual o tamanho mínimo da série histórica?
- Alexander Binnie (1839-1917):
  - Análise de 123 estações com mais de 50 anos de dados
  - Médias móveis (2 dados, 3 dados,..., 40 dados)

# Tamanho das séries históricas

(Erros médios associados ao tamanho da série)

# Tamanho das séries históricas

- Dados de chuva:

Série ideal:  $\geq 30$  anos (erro médio  $\leq 2\%$ )

Série aceitável:  $\geq 15$  anos (erro médio  $\leq 5\%$ )

- Chuva sobre o gramado do Prédio Principal da ESALQ - Filipe Paes
- Isoietas

<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2015c/agrarias/pluviometria%20da%20bacia.pdf>

- Área de contribuição de um Bueiro

<http://www.ebanataw.com.br/drenagem/area.htm>

- Gráfico de chuvas no mês de Março

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>