

5 - Precipitação

- Conhecer as formas de medir chuvas
- Processar dados pluviométricos
- Analisar frequência de precipitação

Objetivo: Conhecer as formas de medir chuva

PARTE 1



5 - Precipitação

5

- Todas as formas de umidade emanadas da atmosfera e depositadas na superfície da terra:

– Chuva

Condensação acontece nas camadas mais elevadas da atmosfera

→ **Maior contribuição para Q rios**

– Granizo

– Neve

– Orvalho

– Geada

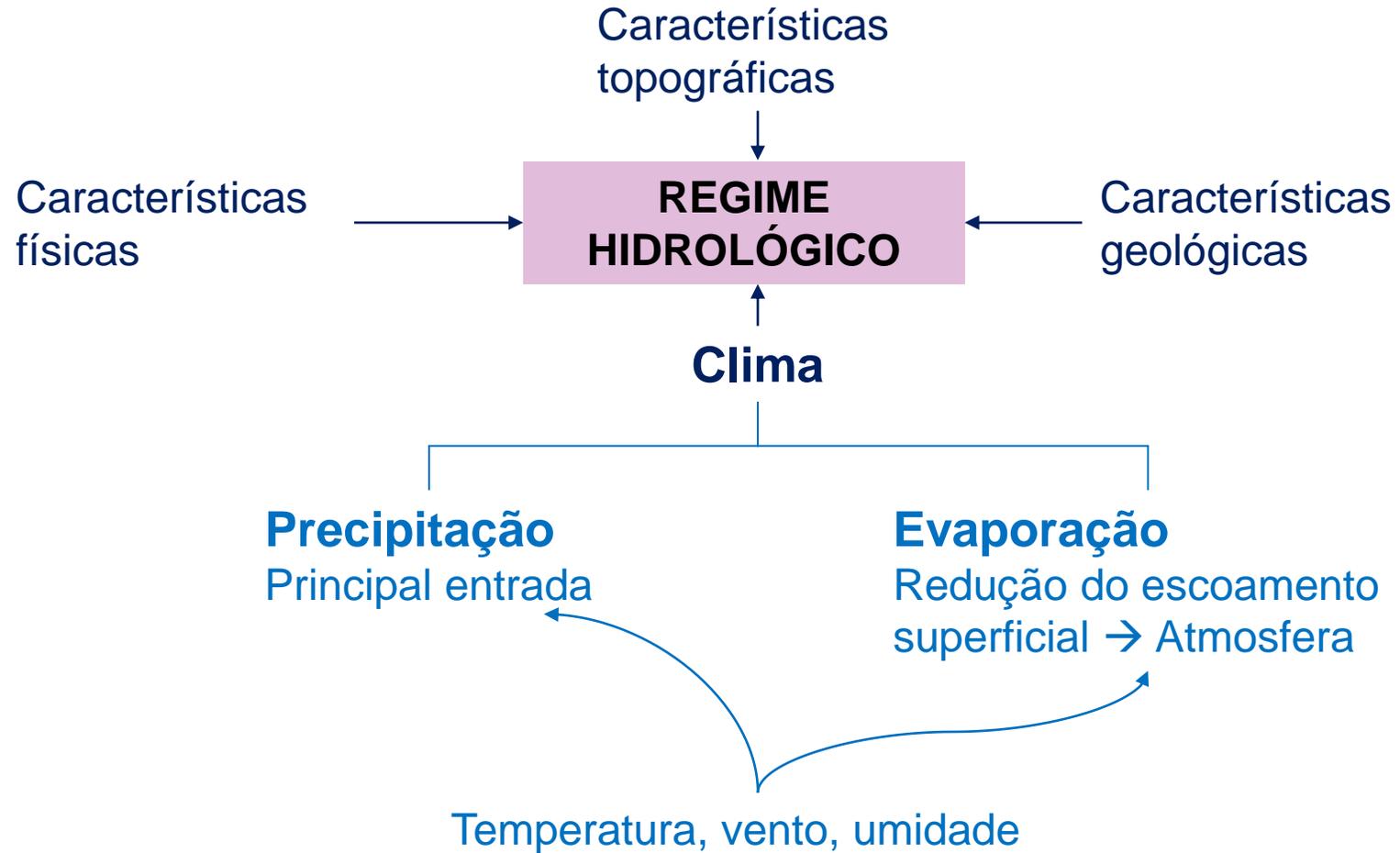
– Neblina

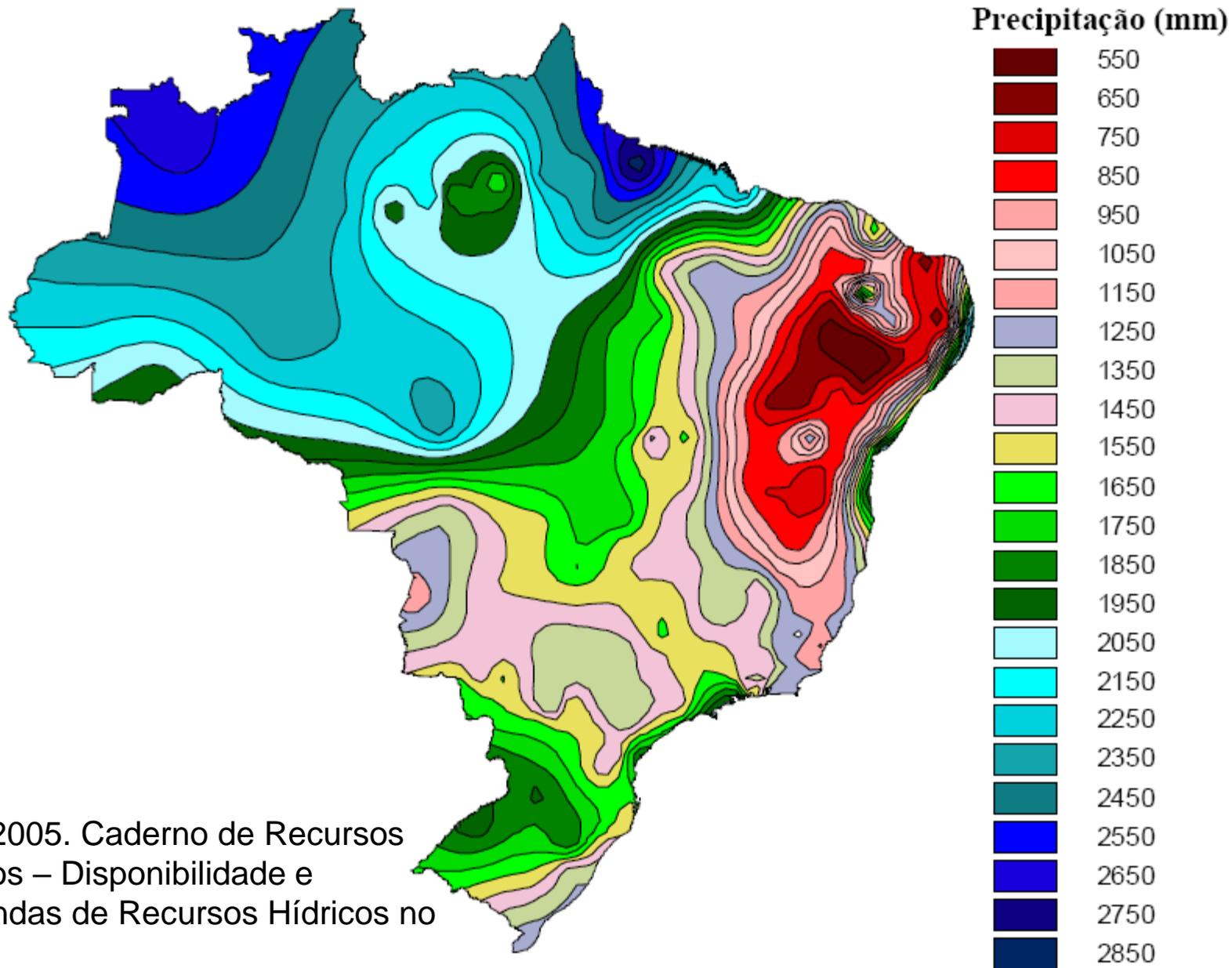
Condensações superficiais



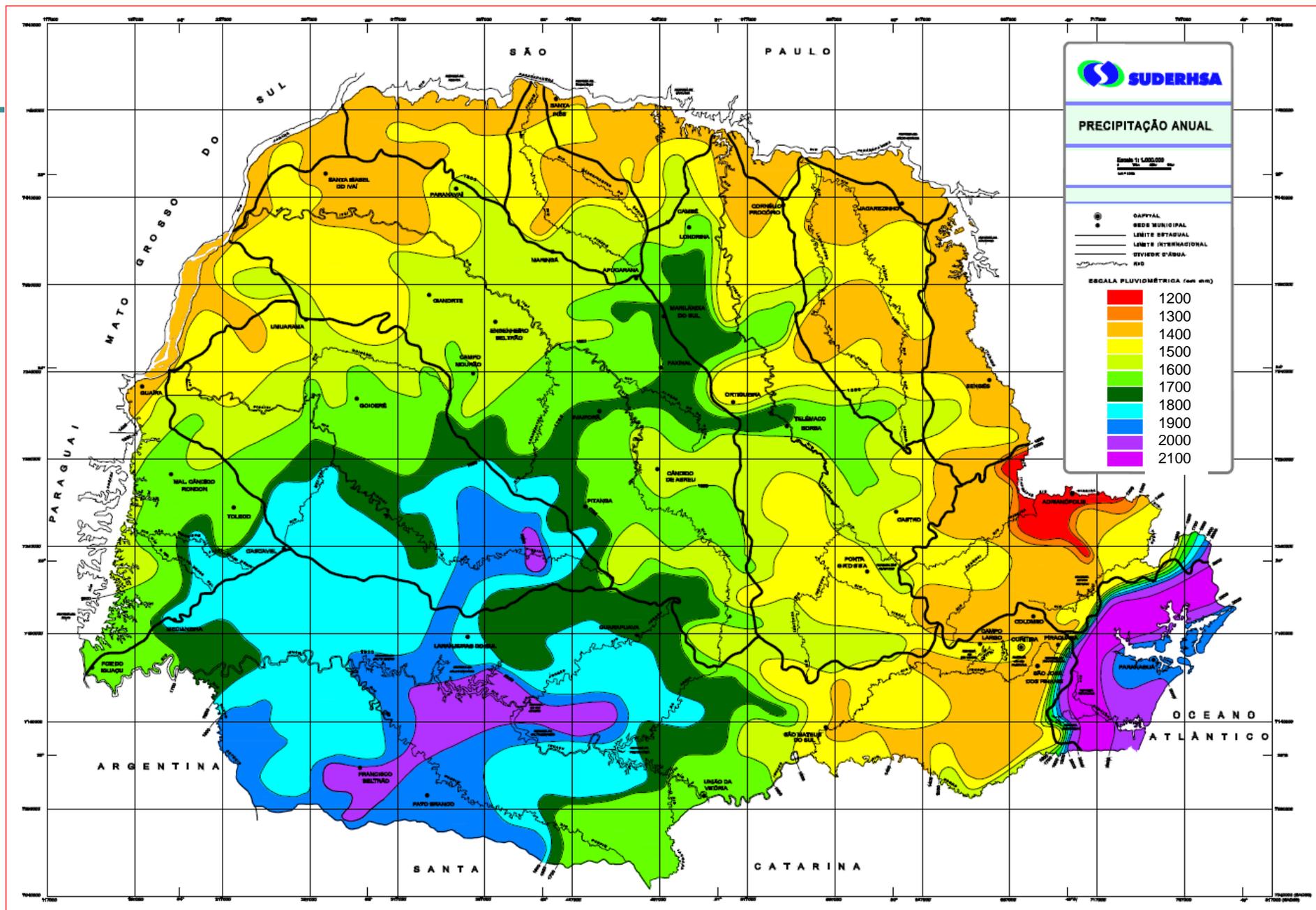
5.1 - Generalidades

5



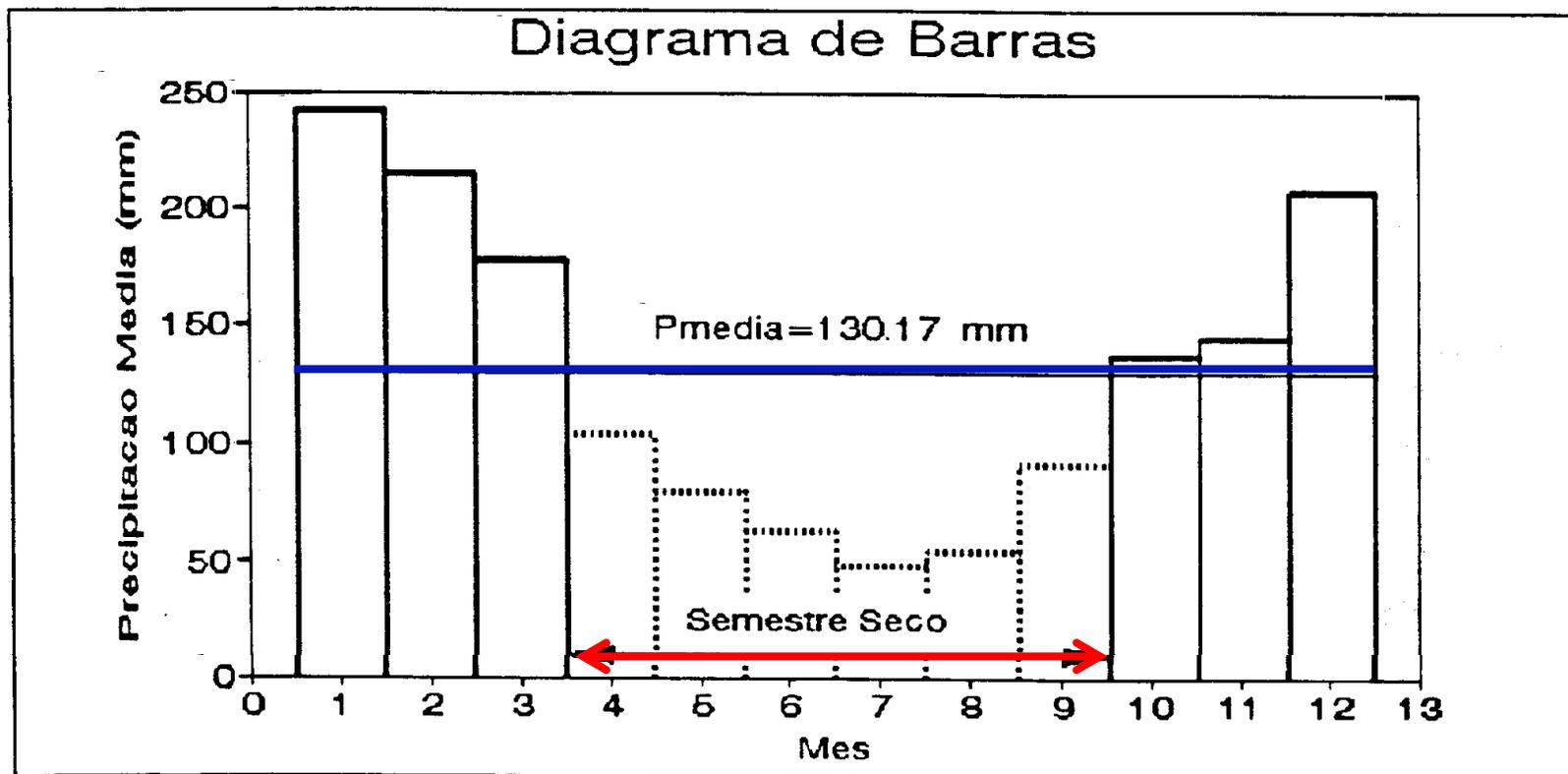


ANA. 2005. Caderno de Recursos Hídricos – Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil.



Variação temporal

5



5.2 - Precipitação - Formação

5

- Elemento básico: umidade atmosférica
 - Mecanismo de resfriamento do ar
 - Presença de núcleos higroscópicos (ou de condensação), para que haja condensação
 - Mecanismo de crescimento das gotas
 - Coalescência (colisão)
 - Difusão
- Sal, pólen, material particulado, fuligem, etc

5.3 – Fatores climáticos

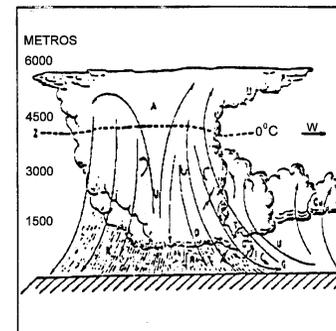
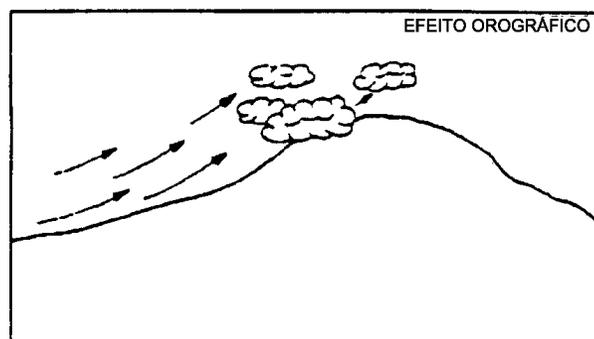
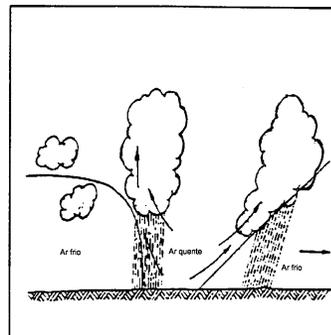
5

- Fenômenos meteorológicos que influenciam:
 - Posição da região em relação à circulação geral da atmosfera
 - Ocorrência de umidade
 - Distribuição da temperatura
 - Vento
- Ver em Hidrometeorologia:
 - a. Atmosfera
 - b. Circulação geral da atmosfera e ventos
 - c. Umidade atmosférica
 - d. Temperatura

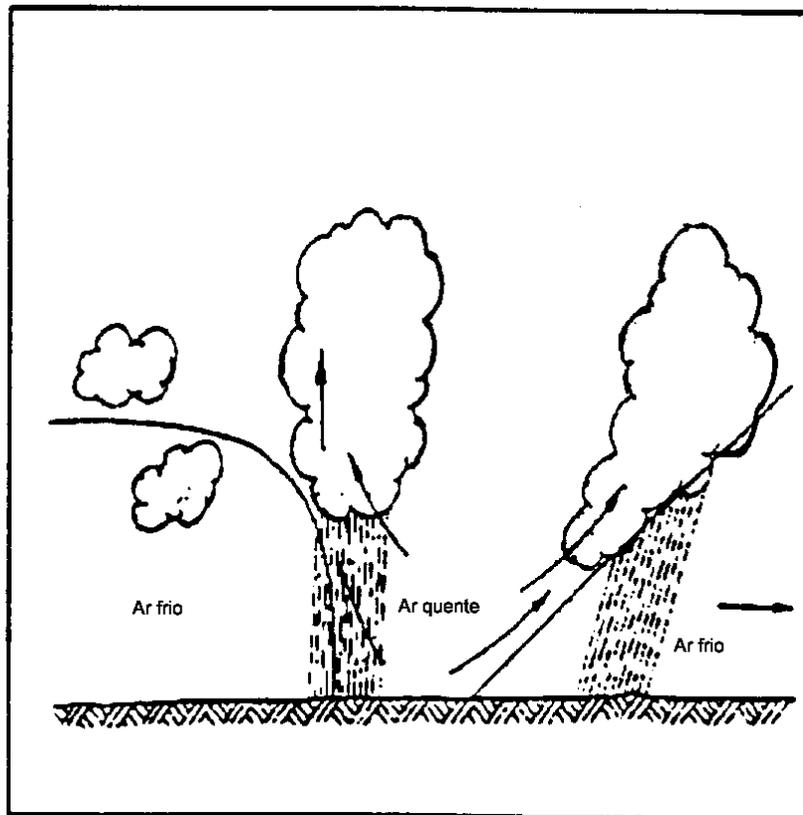
5.4 - Tipos de chuvas

5

- Ciclônica (frontal)
- Orográfica
- Convectiva



a) Chuva ciclônica



Fonte: Villela & Mattos (1975)

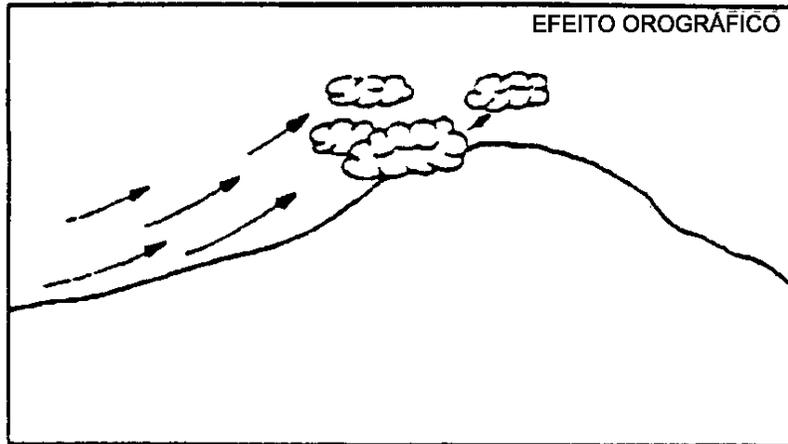
Chuvas frontais.
Provocadas por “frentes”; no Brasil predominam as frentes frias provindas do sul

- Longa duração, **intensidade baixa ou moderada**, podendo causar diminuição da temperatura

Interessam em projetos de obras hidrelétricas; controle de cheias regionais; navegação

Projetos em grandes bacias

b) Chuva orográfica



São provocadas por grandes barreiras de montanhas (ex.: Serra do Mar)

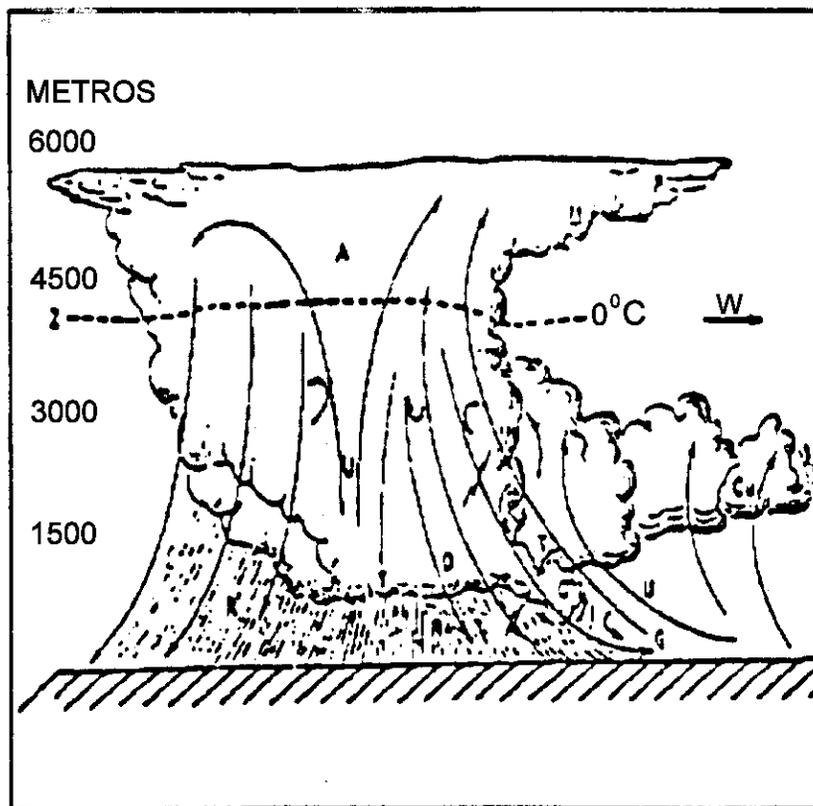
As chuvas são localizadas e intermitentes.

Possuem **intensidade** bastante **elevada**.

Geralmente são acompanhadas de **neblina**.

c) Chuvas convectivas

“Chuvas de verão”



Ocorrem em dias quentes, geralmente no fim da tarde ou começo da noite;

Podem iniciar com granizo; Podem ser acompanhadas de descargas elétricas e de rajadas de vento;

Interessam às obras em pequenas bacias, como para cálculo de bueiros, galerias de águas pluviais, etc

Resultantes de convecções térmicas, que é um fenômeno provocado pelo **forte aquecimento de camadas próximas à superfície terrestre**, resultando numa rápida subida do ar aquecido. A brusca ascensão promove um forte resfriamento das massas de ar que se condensam quase que instantaneamente.

5.5 – Medição

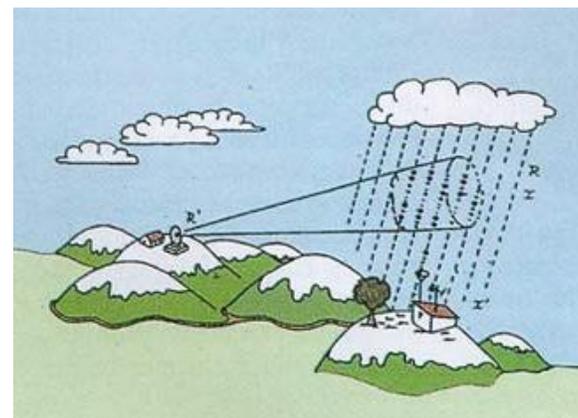
- Pontual:

- Pluviômetros
- Pluviógrafos
- Disdrômetro

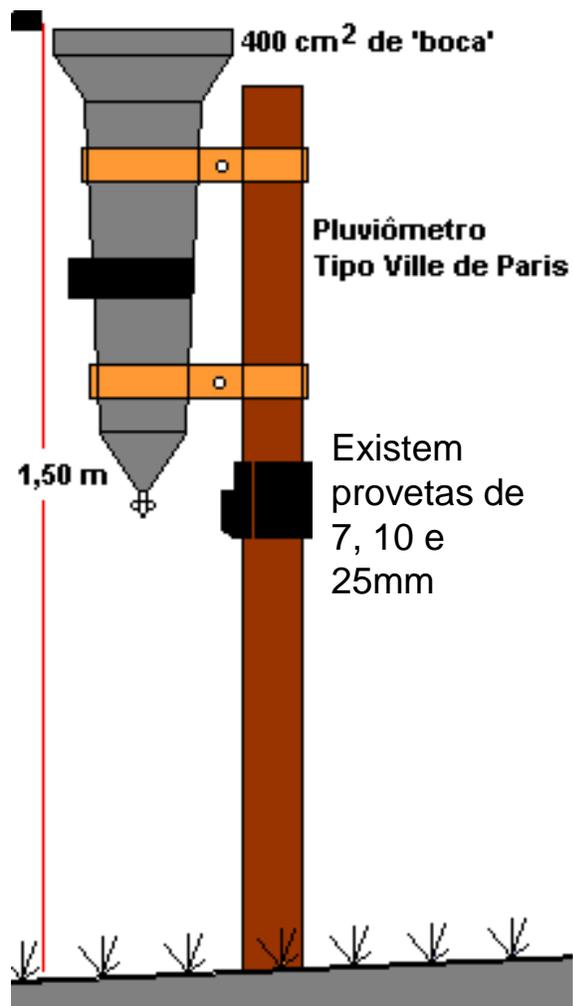


- Espacial:

- Radares



a) Pluviômetros



1 medida a cada 24h, normalmente às 7h da manhã.

Superfície receptora:
Ville de Paris: 400 cm²
Paulista: 500 cm²
Casella: 200 cm²
Snowdon 125 cm²



b) Pluviógrafos

1

Registro contínuo dos dados de precipitação

Os registros dos pluviógrafos são indispensáveis para estudo de chuvas de curta duração.

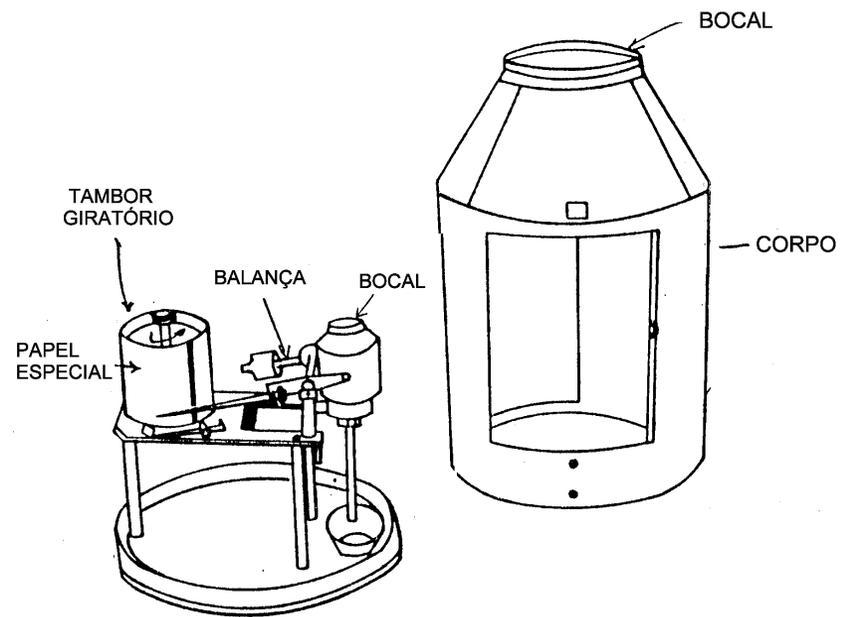
Projetos de galerias pluviais

Superfície receptora:

200 cm²

Pluviógrafos de peso

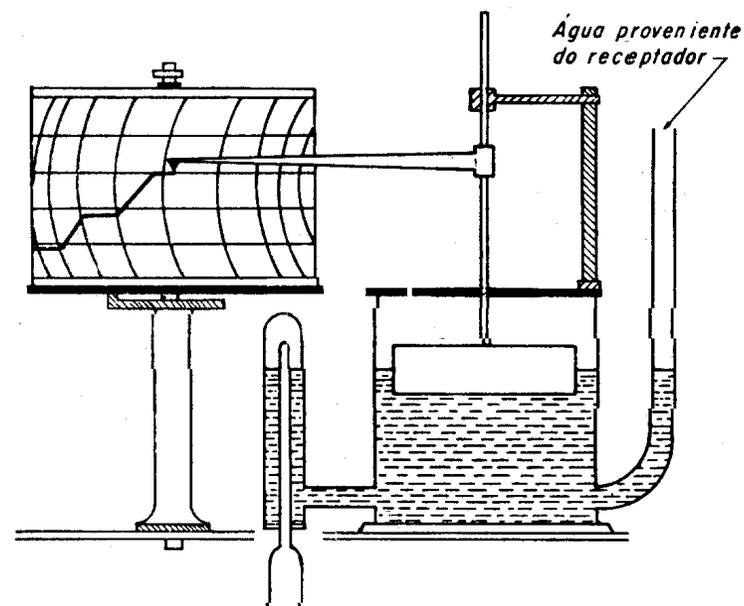
O receptor repousa sobre uma escala de pesagem que aciona a pena e esta traça um gráfico de precipitação sob a forma de um diagrama (altura de precipitação acumulada x tempo)



Pluviógrafos de flutuador

Muito semelhante ao pluviógrafo de peso.

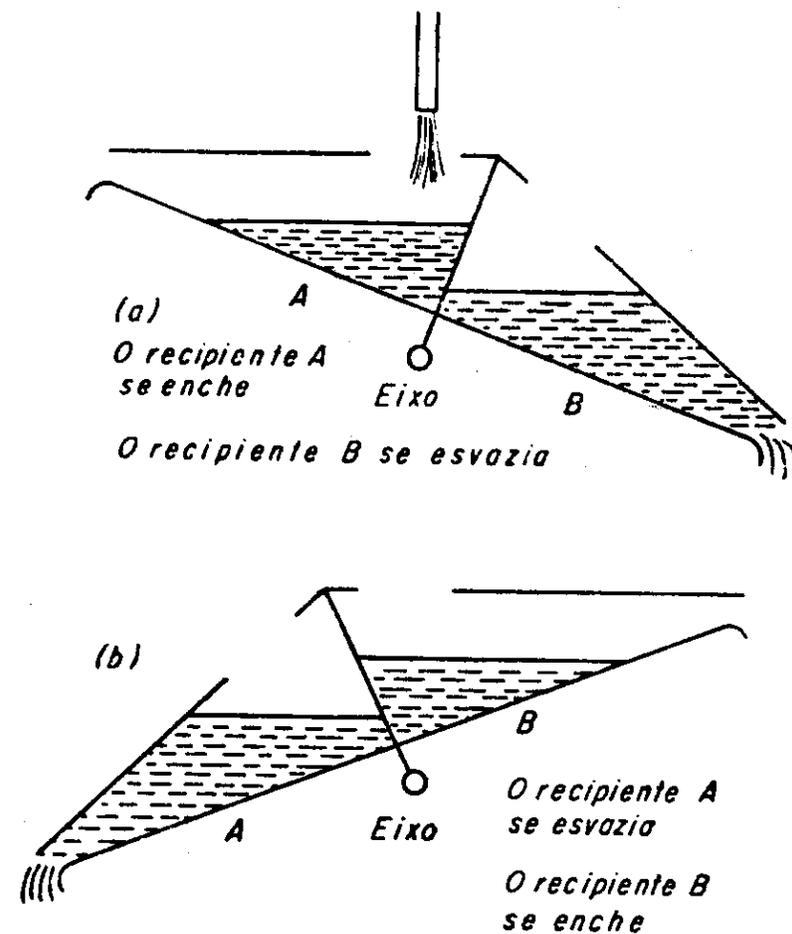
A pena é acionada por um flutuador situado na superfície da água contida no receptor.



Pluviógrafos

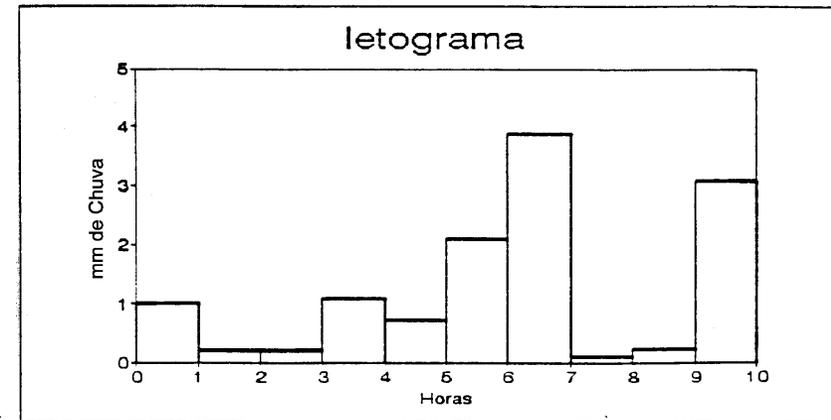
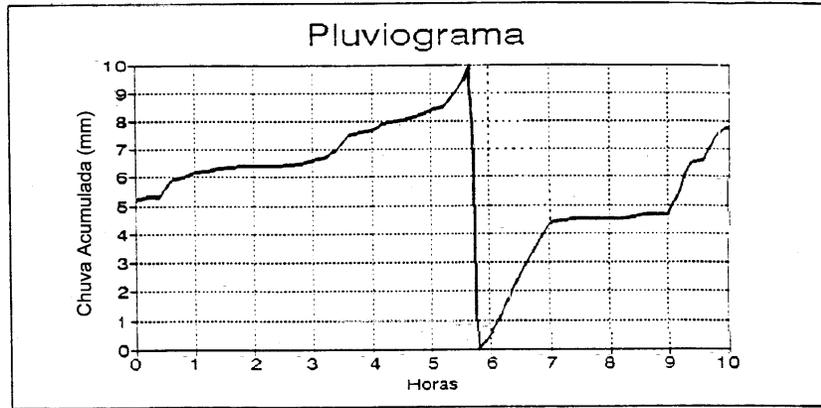
de caçambas basculantes

A caçamba é conectada eletricamente a um registrador, sendo que uma basculada equivale a 0,25 mm de chuva.



Gráficos

1



Altura Pluviométrica - É a altura de água precipitada (h), geralmente em mm. Trata-se de uma medida pontual representativa da água precipitada por unidade de área horizontal.

Intensidade da precipitação - É a relação entre a altura pluviométrica e a duração da precipitação, expressa em geral em mm/h ou mm/min ou l/s*ha.

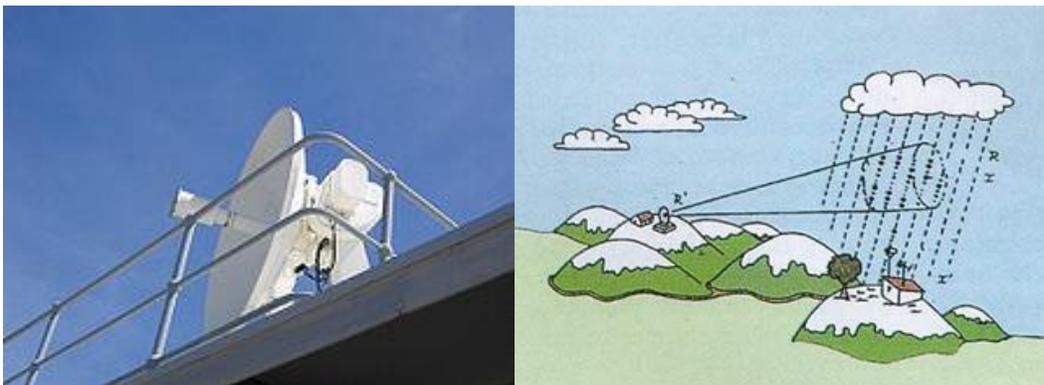
Duração - Período de tempo contado desde o início até o fim da precipitação.

c) Disdrômetro



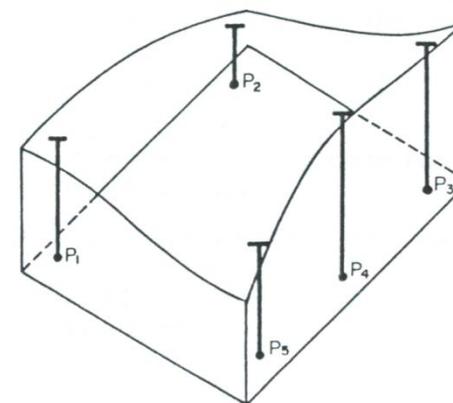
d) Radar

Análise de erros de estimativas da intensidade de chuva por radar Collier (1986)



50% dos casos →
diferenças superiores a
30% que aqueles
medidos por pluviógrafos

Estimativa da precipitação fora da localização exata dos registradores (pontuais), a interpolação de valores observados em pluviógrafos vizinhos pode, dependendo da distância entre eles, conduzir a erros superiores aos do radar.



d) Redes de monitoramento

Rede básica → recolhe permanentemente os elementos necessários ao conhecimento do regime pluviométrico de um País (ou Estado);
Redes regionais → fornece informações para estudos específicos de uma região.

Densidade da rede:

Brasil → um posto a cada 400 - 500 km²;

França → um posto a cada 200 km²;

Inglaterra → um posto a cada 50 km²;

Estados Unidos → um posto a cada 310 km²;

Ano!

No Estado de São Paulo, o DAEE/ CTH opera uma rede básica com cerca de 1000 pluviômetros e 130 pluviógrafos, com uma densidade de aproximadamente um posto a cada 250 km². (Ano!)

Exercícios – Análise de pluviograma

5

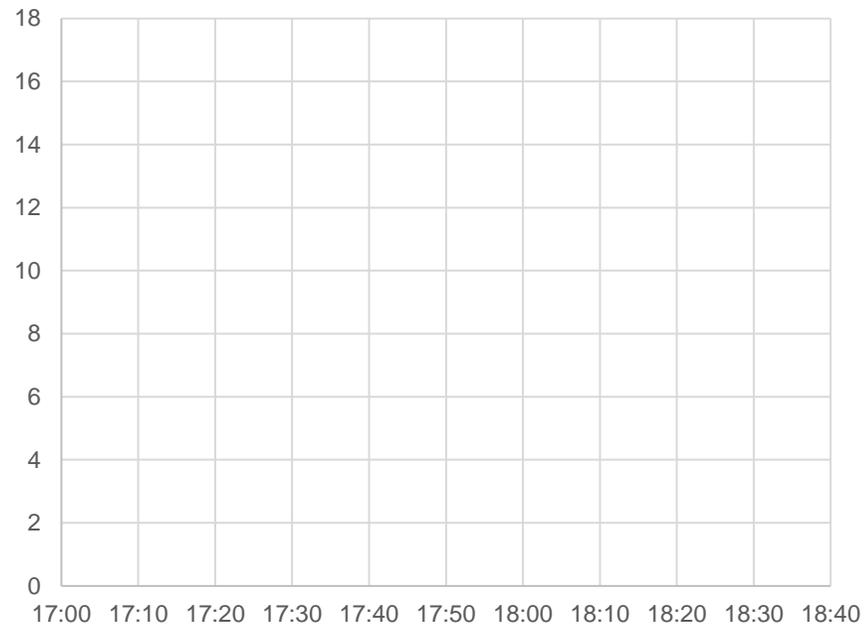
Exercício 1

O quadro indica a altura de chuva acumulada ao longo do tempo.

- Faça o **hietograma**, gráfico de **P(mm)** versus **tempo**.
- Calcule e represente graficamente a variação da **intensidade da chuva** com a sua **duração**.

Hora	Chuva acumulada (mm)
17:10	2,0
:20	6,0
:30	8,0
:40	8,0
:50	9,0
18:00	10,0
:10	13,0
:20	15,0
:30	17,0
:40	17,0

Chuva acumulada (mm)



Hora	Chuva acumulada (mm)
17:10	2,0
:20	6,0
:30	8,0
:40	8,0
:50	9,0
18:00	10,0
:10	13,0
:20	15,0
:30	17,0
:40	17,0

Exercícios – Análise de pluviograma

5

Exercício 2

Tendo em vista os dados constantes na tabela, calcular as máximas intensidades médias correspondentes a períodos de:

- a) 15 min;
- b) 22,5 min; e
- c) 30 min

Obs.: Considerar que o pluviograma é formado por uma série de segmentos de reta

Hora	Chuva acumulada (mm)
8:00	Zero
:15	1,0
:30	5,0
:45	7,0
9:00	10,5
:15	14,0

Objetivo: Processar de dados pluviométricos

PARTE 2

5.6 - Processamento de dados pluviométricos

5

Análises de consistência dos dados

- Detecção de erros grosseiros
- Preenchimento de falhas
- Verificação de homogeneidade dos dados

a) Detecção de erros grosseiros

PLUVIÔMETRO

- observações marcadas em dias que não existem (ex.: 31 de abril);
- quantidades absurdas (ex.: 1000 mm em um dia);
- erro de transcrição (ex.: 0,36 mm em vez de 3,6 mm).

PLUVIÓGRAFO

- defeito na sifonagem

b) Preenchimento de falhas

Falhas devido:

- Ausência de observador
- Defeito do aparelho

Método de ponderação regional

Pelo menos 3 postos, climaticamente homogêneos, localizados **o mais próximo possível do posto com falhas**, com um mínimo de 10 anos de dados.

$$P_x = \frac{1}{3} \left(\frac{N_x}{N_A} P_A + \frac{N_x}{N_B} P_B + \frac{N_x}{N_C} P_C \right)$$

Séries mensais ou anuais

Onde:

P_x é o valor de chuva que se deseja determinar;

N_x é a precipitação média anual do posto x ;

N_A , N_B e N_C são, respectivamente, as precipitações médias anuais dos postos vizinhos A , B e C , no mesmo período de N_x ;

P_A , P_B e P_C são, respectivamente, as precipitações observadas no instante que o posto x falhou.

Exercício 1

Preencher a falta de dados ocorrida no mês de janeiro no ano de 1963 no posto E5-46. Totais mensais dos meses de janeiro dos postos E5-51, E5-52 e E5-47, todos vizinhos ao ponto em questão, no período de 1958-1968, são disponíveis.

Ano	PX(mm)	PA(mm)	PB(mm)	PC(mm)
	E5-46	E5-51	E5-52	E5-47
1958	117,4	157,3	249,6	224,8
1959	125,3	241,6	374,6	265,1
1960	131,8	250,9	267,6	261,2
1961	159,4	55,6	121,8	57
1962	52,4	158,9	85,4	95,4
1963		344	276,6	231,4
1964	64,2	39,3	81,8	21,3
1965	174	253,3	285,4	290,6
1966	137,8	64,7	150,2	201,2
1967	168,3	126,1	170,3	123,2
1968	255,5	249,5	339,3	285,1

Exercício 2

Preencher a falta de dados ocorrida no mês de janeiro no ano de 1964 no posto E5-46. Totais mensais dos meses de janeiro dos postos E5-51, E5-52 e E5-47, todos vizinhos ao ponto em questão, no período de 1958-1968, são disponíveis.

	PX(mm)	PA(mm)	PB(mm)	PC(mm)
Ano	E5-46	E5-51	E5-52	E5-47
1958	117,4	157,3	249,6	224,8
1959	125,3	241,6	374,6	265,1
1960	131,8	250,9	267,6	261,2
1961	159,4	55,6	121,8	57
1962	52,4	158,9	85,4	95,4
1963	215,3	344	276,6	231,4
1964		39,3	81,8	21,3
1965	174	253,3	285,4	290,6
1966	137,8	64,7	150,2	201,2
1967	168,3	126,1	170,3	123,2
1968	255,5	249,5	339,3	285,1

Outros métodos de preenchimento de falhas:

Análise de regressões lineares, simples ou múltipla

Buscar correlação entre as precipitações do posto com falha e de um posto vizinho.

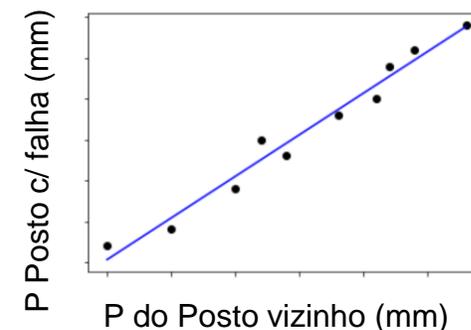
Método de ponderação regional baseado nas correlações com as estações vizinhas.

Uma variação do procedimento de cálculo

Estabelece-se regressões lineares entre o posto pluviométrico com falhas e cada um dos postos vizinhos. De cada uma das regressões lineares efetuadas obtém-se o coeficiente de correlação, r , e calcula-se P_x :

$$P_x = \frac{r_{xA} P_A + r_{xB} P_B + r_{xC} P_C}{r_{xA} + r_{xB} + r_{xC}}$$

Por exemplo:

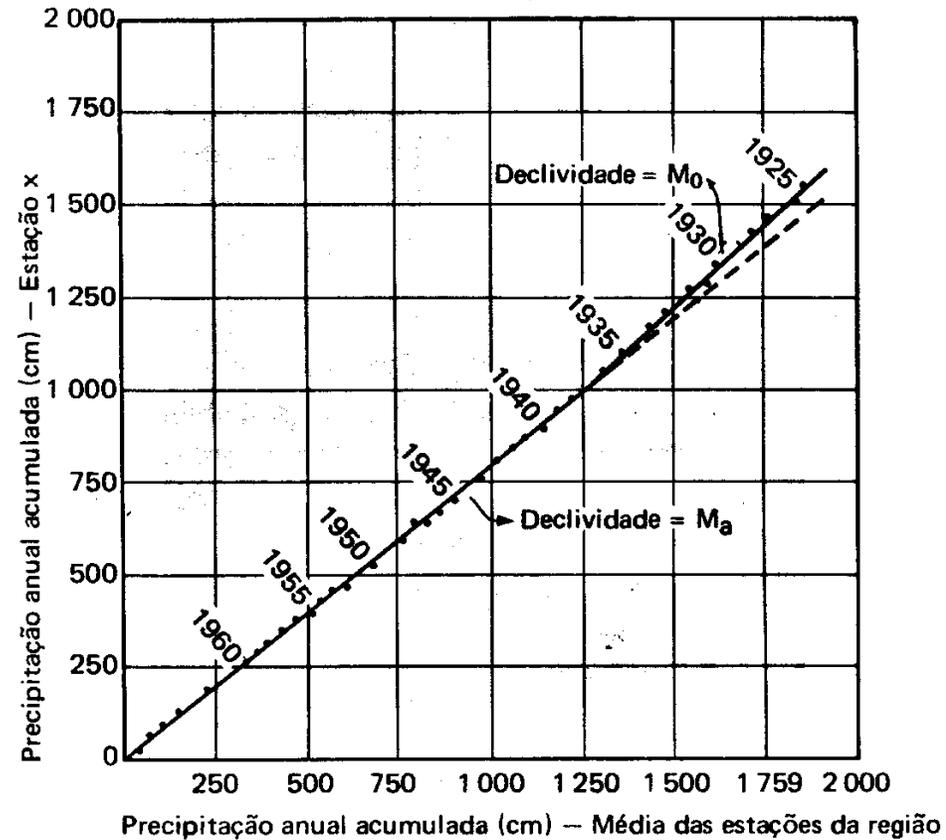


c) Verificação de homogeneidade dos dados

5

Se houve alguma anormalidade na estação, como mudanças:

- de local
- nas condições do aparelho
- no método de observação



Fonte: Villela & Mattos (1975)

c.1) Análise de dupla-massa

Este método compara os valores acumulados anuais (ou sazonais) da estação X com os valores da estação de referência, que é usualmente a média de diversos postos vizinhos.

$$P_a = \frac{M_a}{M_0} P_0$$

Onde:

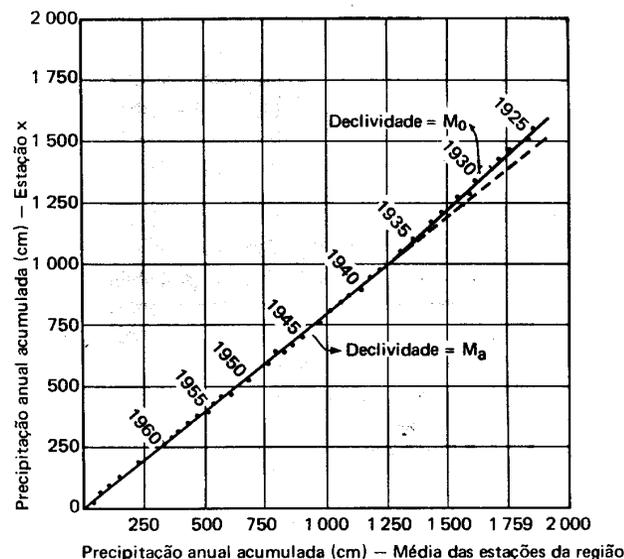
P_a são os valores corrigidos/ajustados;
 P_0 são dados a serem corrigidos/ajustados;

M_a é o coeficiente angular da reta no período mais recente, anterior à sua inclinação brusca;

M_0 é o coeficiente angular da reta no período a ser corrigido.

*P não é acumulado

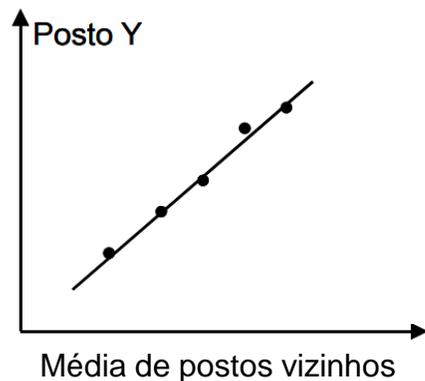
Método válido para séries mensais e anuais



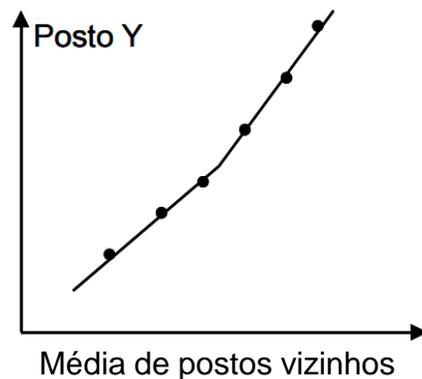
Método não adequado para precipitações diárias nem precipitações intensas.

Procedimento

1. Escolher vários postos (estações) de uma região homogênea como base de comparação;
2. Acumular os totais anuais (ou mensais) de cada posto da base de comparação;
3. Calcular a média dos totais acumulados em cada ano (ou mês) da base de comparação;
4. Acumular os totais anuais (ou mensais) do posto em análise;
5. Plotar as médias dos totais acumulados anuais (ou mensais) da base de comparação (abscissas) e os totais anuais (ou mensais) do posto em análise

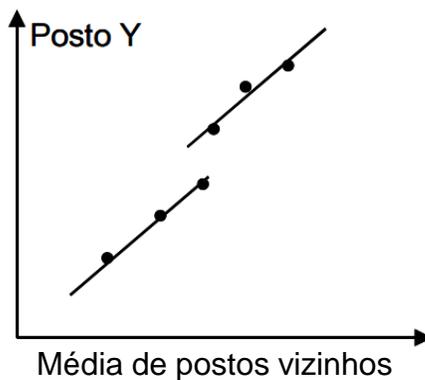


Indica uma proporcionalidade entre os dados

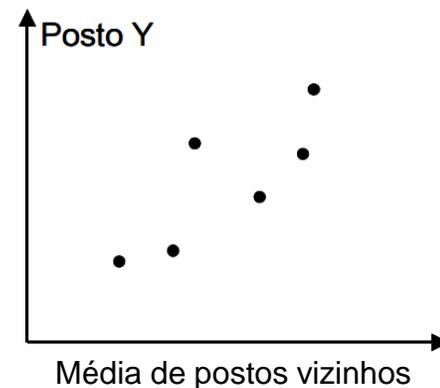


Indica uma mudança de tendência no posto a consistir, que pode ser causada por:

- erros sistemáticos (por exemplo, mudança do operador, que está fazendo a leitura do instrumento erroneamente),
- alterações climáticas, como a construção de um lago artificial próximo ao local de medição
- etc



Principal causa: erros de transcrição dos dados (na leitura ou durante o processamento das informações)



Nenhuma tendência clara. Indica, geralmente, que os postos em questão apresentam regimes pluviométricos distintos, não devem ser usados conjuntamente nos estudos hidrológicos

Exercício

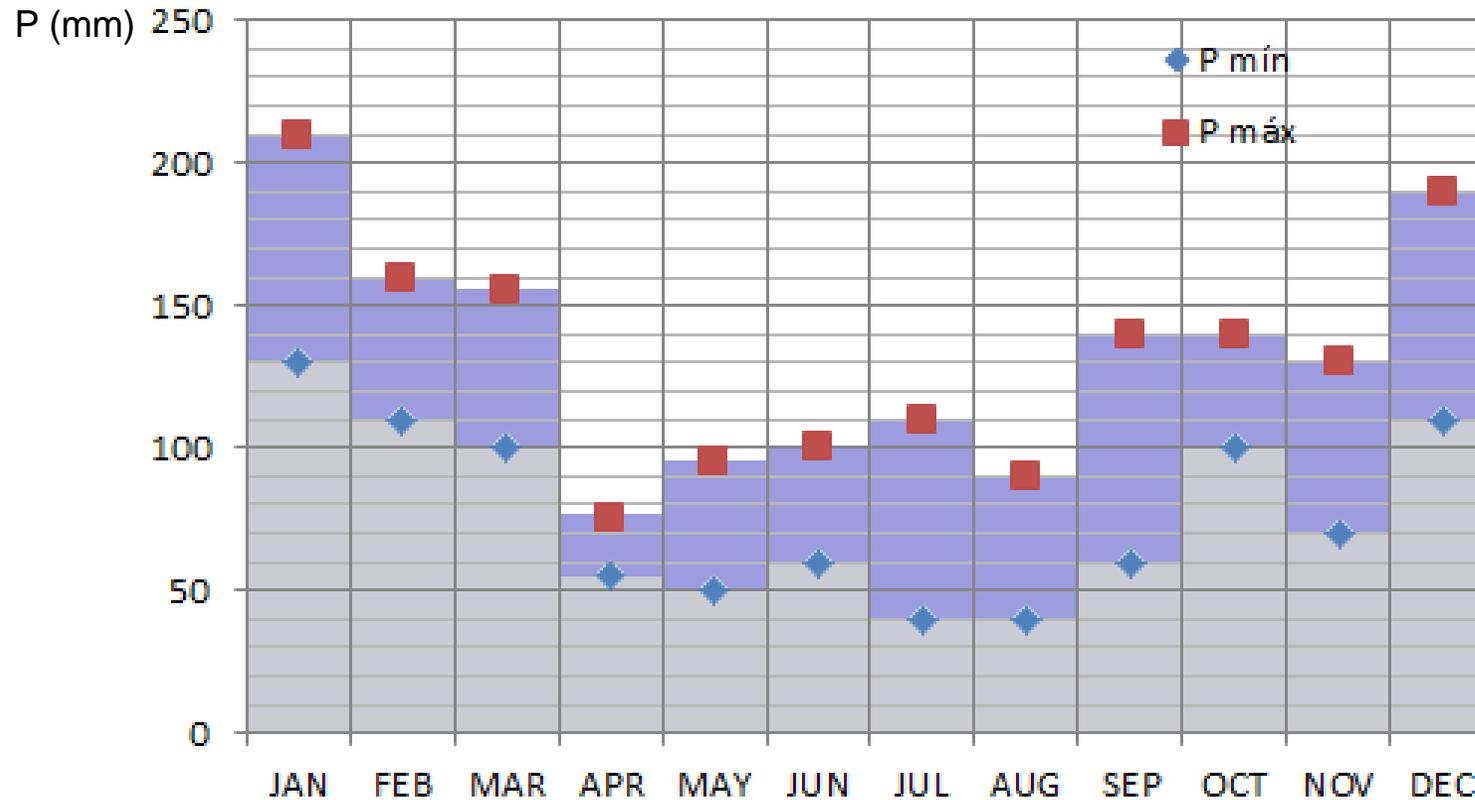
5

Verifique a homogeneidade dos dados do Posto 1. Efetue correções, se necessário.

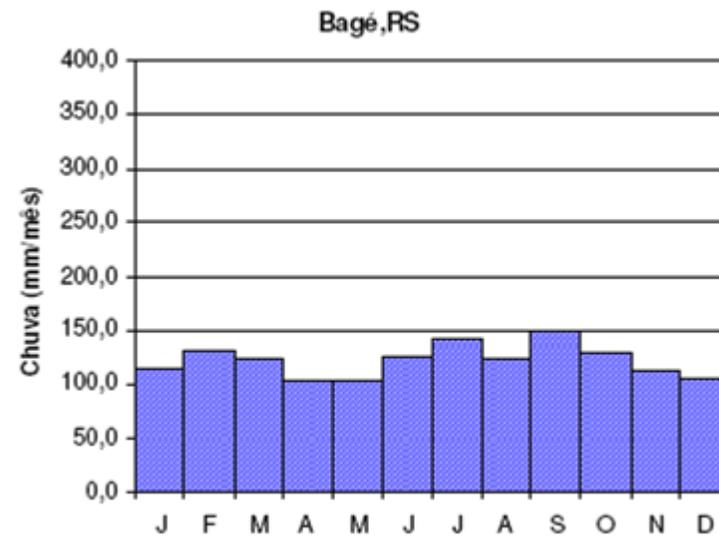
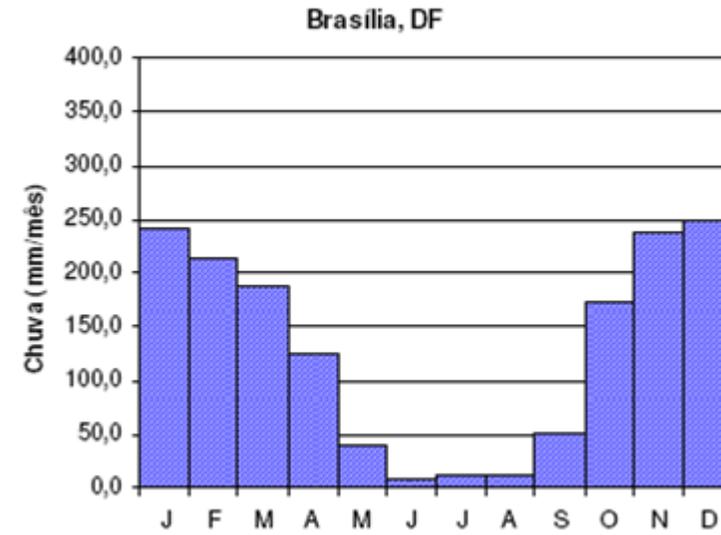
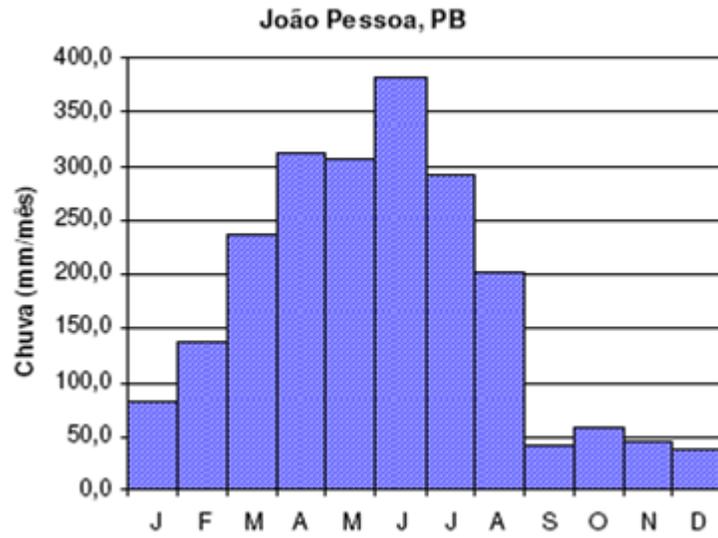
ANO	P	
	Média Região	Posto 1
1926	37,27	32,85
1927	35,61	28,08
1928	41,24	33,51
1929	35,6	29,58
1930	34,7	23,76
1931	53,23	58,39
1932	44,18	46,24
1933	31,88	30,34
1934	40,49	46,78
1935	40,47	38,06
1936	36,33	42,82

5.7 - Precipitação média histórica

5

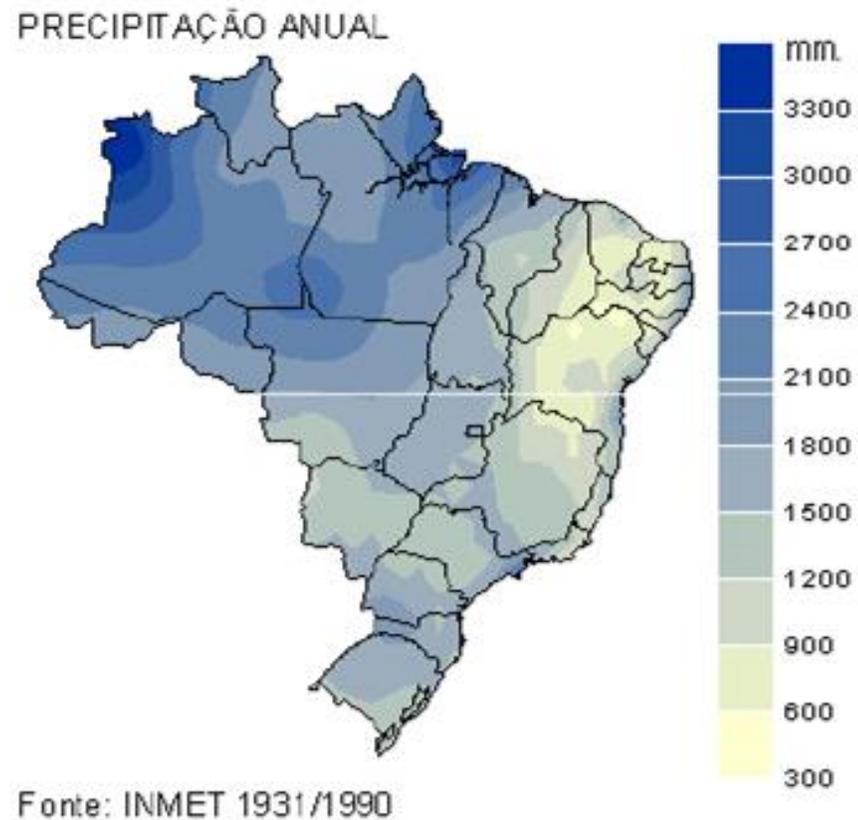
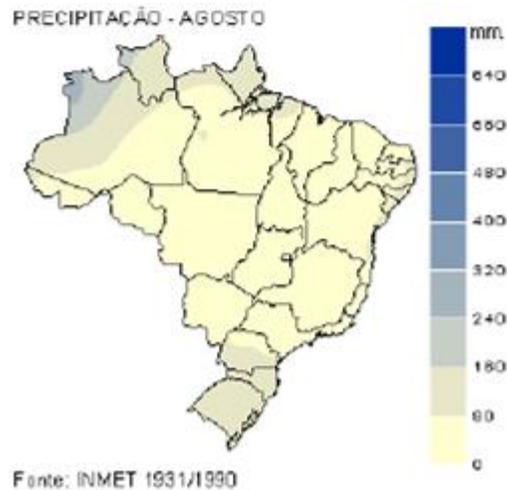
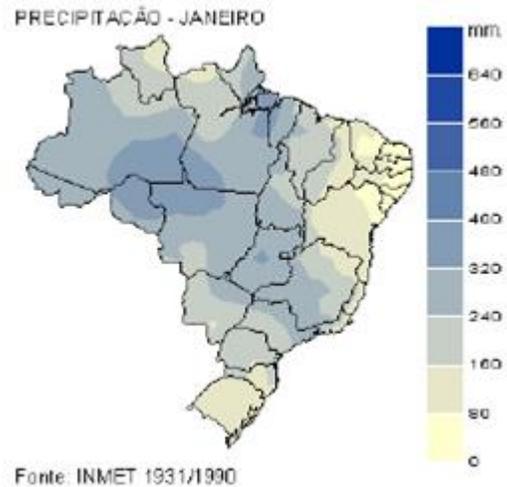


Região Metropolitana de Curitiba



Variabilidade espacial e temporal

5



5.8 - Precipitações médias sobre uma bacia hidrográfica

5

- Método da média aritmética
- Método dos polígonos de Thiessen
- Método das isoietas
- Método da superfície

a) Método da média aritmética

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

Média aritmética das alturas pluviométricas dos **postos** localizados **dentro da bacia**.

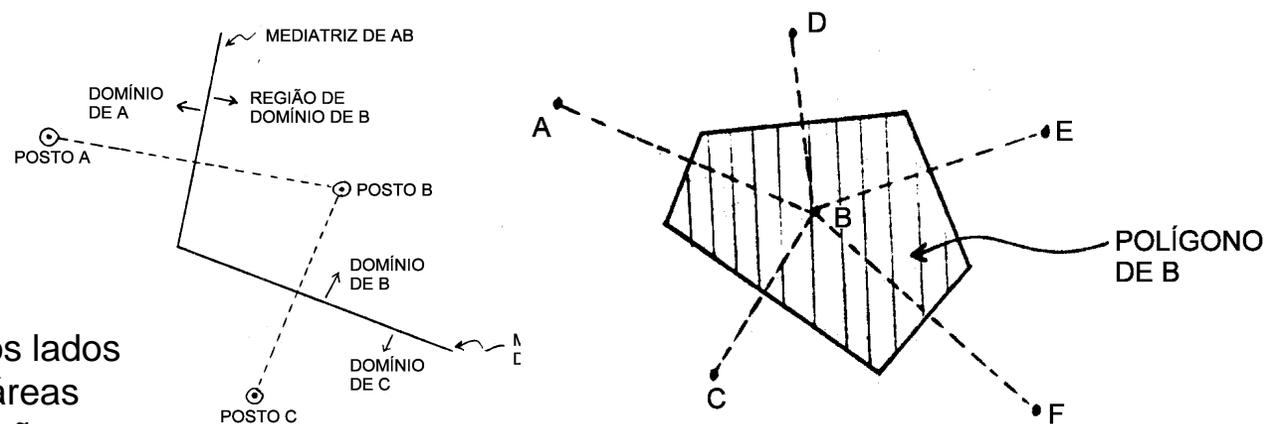
onde \bar{P} é chuva média na bacia;
 P_i é a altura pluviométrica registrada em cada posto;
 n é o número de postos na bacia hidrográfica.

Observação: Este método só é recomendado para bacias menores que 5.000 km², com postos pluviométricos uniformemente distribuídos e se a área for plana ou de relevo suave. Em geral, este método é usado apenas para comparações.

b) Método dos polígonos de Thiessen

Polígonos de Thiessen são áreas de “domínio” de um posto pluviométrico. Considera-se que no interior dessas áreas a altura pluviométrica é a mesma do respectivo posto.

- Unir os postos adjacentes por linhas retas
- Traçar as mediatrizes destas retas
- Formando polígonos, cujos lados constituem os limites das áreas de influência de cada estação



onde

\bar{P} é a precipitação média na bacia (mm);

P_i é a precipitação no posto i (mm);

A_i é a área do respectivo polígono, dentro da bacia (km²);

A é a área total da bacia.

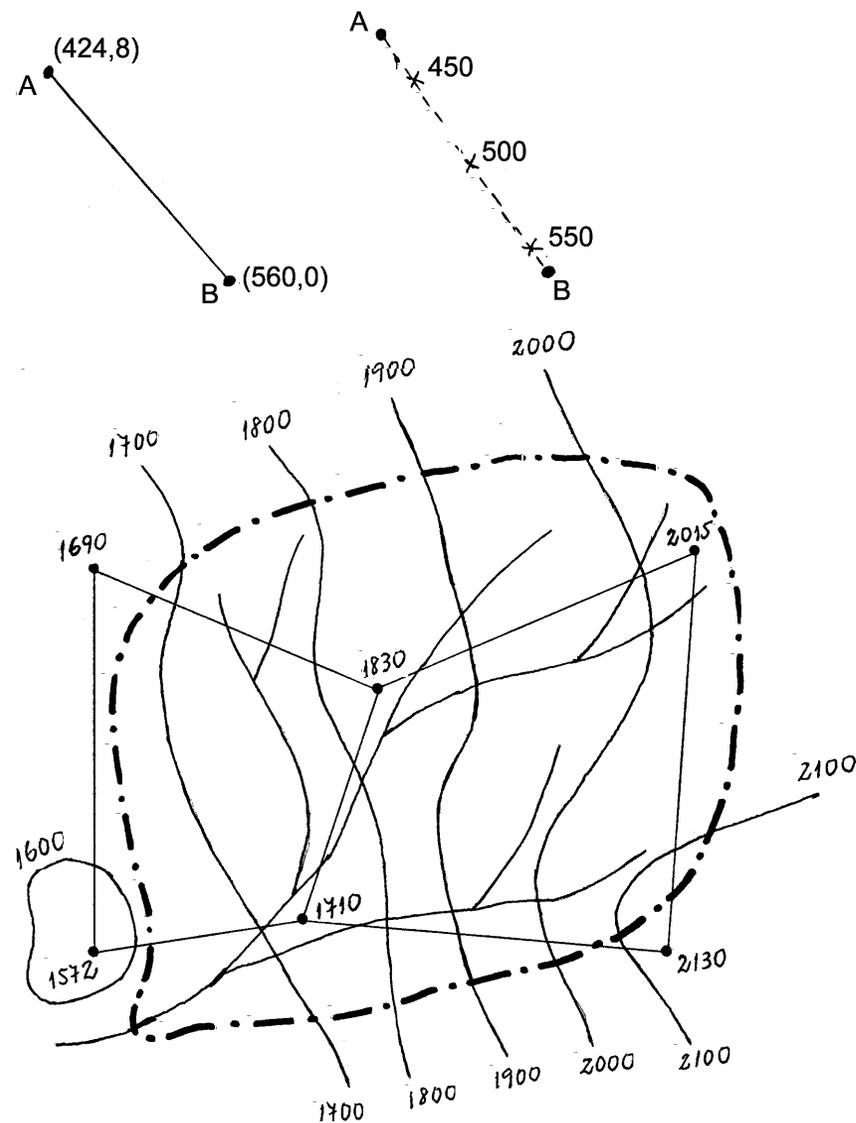
$$\bar{P} = \frac{\sum P_i A_i}{A}$$

c) Método das isoietas

Isoietas são linhas indicativas de mesma altura pluviométrica.

O **espaçamento** entre elas depende do tipo de estudo, podendo ser de 5 em 5 mm, 10 em 10 mm, etc.

O **traçado** das isoietas é feito da mesma maneira que se procede em topografia para desenhar as curvas de nível, a partir das cotas de alguns pontos levantados.



Cálculo da precipitação média na bacia (método das isoietas):

$$\bar{P} = \frac{\sum \bar{P}_i A_i}{A}$$

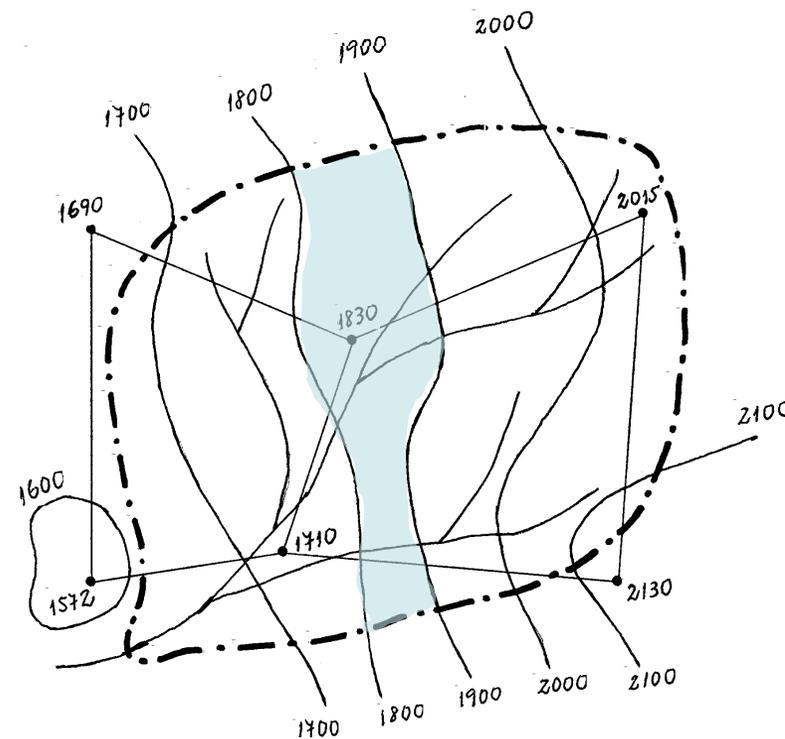
onde

\bar{P} é a precipitação média na bacia (mm);

\bar{P}_i é a média aritmética das duas isoietas seguidas i e $i + 1$;

A_i é a área da bacia compreendida entre as duas respectivas isoietas (km²);

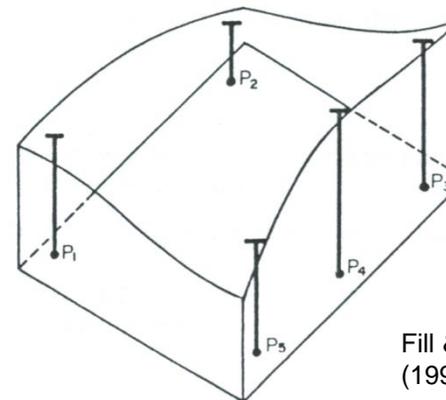
A é a área total da bacia (km²).



d) Método da superfície de precipitação

- Vários métodos de interpolação:

- Kriging
- Inverso da distância
- Linear
- *Splines*
- *Outros*



Fill & Mine
(1998)

10				
				9
		8		
7				

Precipitações medidas

10	9			
9,3	8,8	8,7	8,5	9
8,6	8,3	8	8,5	
7,7	7,5			
7				

Interpolação

Cálculo da precipitação média na bacia (método da superfície):

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i}{A}$$

Onde:

\bar{P} é a precipitação média na bacia;

P_i é a precipitação no pixel i , compreendido dentro da bacia;

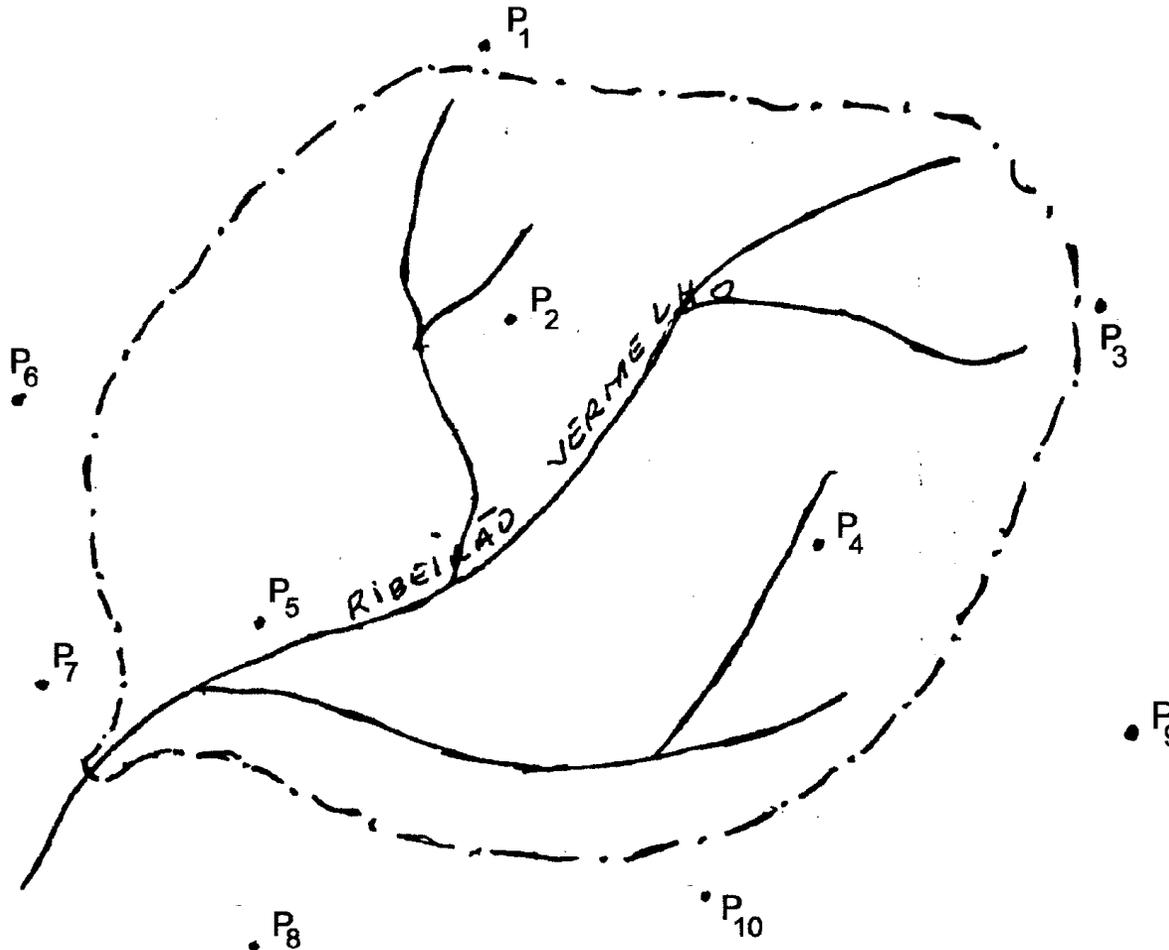
A_i é a área do pixel i ;

A é a área total da bacia.

Exercício 3 – Precipitação média na bacia

5

Determinar precipitação média na bacia pelos 3 métodos apresentados.
(No método das isoietas, traçar isoietas de 100 em 100 mm)



Precipitação (mm)

P1: 1810

P2: 1830

P3: 2020

P4: 2000

P5: 1710

P6: 1690

P7: 1572

P8: 1700

P9: 2130

P10: 1920

Objetivo: Analisar frequência de precipitação

PARTE 3

5.9 – Análise de frequência de precipitações

Determinar a **magnitude das precipitações** que poderiam ocorrer com uma determinada **probabilidade**.

Probabilidade é
estimada a partir da
frequência relativa



Análise de
frequência



Análise de
extremos

A - Eventos extremos máximos:

- Dimensionamento de vertedores, barragens, canais, obras de desvio de cursos de água, galerias pluviais, bueiros, pontes, etc.

B - Eventos extremos mínimos:

- Projetos de obras de irrigação, abastecimento de água, etc.

C - Avaliação da probabilidade de duração de períodos sem precipitação

Série de dados observados

5

- **Série total**
 - Considera-se **todos os dados** observados
- **Série anual**
 - Considera-se somente **um dado por ano** (por exemplo: o máximo ocorrido no ano), neste caso, número de eventos coincide com o número de anos.
- **Série parcial**
 - Chuva intensa: considera-se **toda precipitação superior a um valor pré-estabelecido**, logo, pode-se ter mais de um evento por ano ou nenhum evento no ano, ou seja, número de eventos pode ser diferente ao número de anos.

Projetos de obras hidráulicas:

- Dimensões em função de considerações de ordem econômica
- Aceita-se certo **RISCO** que a estrutura venha a falhar durante sua vida útil

ANÁLISE ESTATÍSTICA

FREQÜÊNCIA de um evento

PROBABILIDADE de ocorrência

FREQÜÊNCIA que assumiram
dada magnitude

FREQÜÊNCIA que foi igualado
ou superado

Cálculo da freqüência (F)

Probabilidade empírica

5

- Dados são classificados em ORDEM DECRESCENTE
- A cada um é atribuído seu NÚMERO DE ORDEM m
- FREQÜÊNCIA que foi igualado ou superado um evento de ordem m é:

Método Califórnia

$$F[X \geq x_T] = \frac{m}{n}$$

Método de Kimbal

$$F[X \geq x_T] = \frac{m}{n+1}$$

n: Número de anos de observação

m: Número da ordem de maior cheia ou número de vezes que um evento foi igualado ou superado

Período de retorno (T_r)

Período de retorno = Tempo de recorrência = T_r (anos)

Período de tempo médio em que um determinado evento deve ser **igualado ou superado** pelo menos uma vez.

Séries
anuais:

$$T_r = \frac{1}{P[X \geq x_T]}$$

Probabilidade de
excedência



Nesta disciplina,
será trabalhado
somente com
séries anuais

Sendo x_T o evento associado ao tempo de recorrência T_r

Séries
parciais:

$$\frac{1}{T_r} = \sum_{i=1}^n P[N = i] \{1 - (P[X < x_T])^i\}$$

Sendo N o número de eventos em um ano qualquer e
 n o número máximo de eventos em um ano

Eventos extremos **mínimos**:

Séries
anuais:

$$T_r = \frac{1}{P[X \leq x_T]}$$

Probabilidade
acumulada



Nesta disciplina,
será trabalhado
somente com
séries anuais

Sendo x_T o evento associado ao tempo de recorrência T_r

Séries
parciais:

$$\frac{1}{T_r} = \sum_{i=1}^n P[N = i] \left\{ 1 - (P[X > x_T])^i \right\}$$

Sendo N o número de eventos em um ano qualquer e
 n o número máximo de evento em um ano

Período de retorno (T)

Período de retorno = Tempo de recorrência = T_r (anos)

Período de tempo médio em que um determinado evento é igualado ou superado pelo menos uma vez [$X \geq R$]

$$T_r = \frac{1}{P[X \geq R]}$$

Considere evento de magnitude R com tempo de recorrência T_r

Por exemplo:

Uma chuva acontece acima de um determinado valor. A probabilidade dessa chuva ser igualada ou superada é de 5%.

O tempo de retorno é de $1/0,05 = 20$ anos. Isso significa que:

→ em média, há uma expectativa de ocorrência da chuva ser igualada ou excedida uma vez a cada 20 anos

→ a probabilidade de ocorrer falha de 5%

Exercício 4

As seguintes precipitações diárias (consideradas extremas acima de 85 mm) foram observadas na estação em estudo:

	Ano	Eventos		
1	1965	126 (03/4)	95 (23/10)	
2	1966	105 (27/8)		
3	1967	137 (14/7)	89 (05/12)	
4	1968	95 (21/6)		
5	1969	Máxima precipitação: 58 (04/9)		
6	1970	100 (25/5)		
7	1971	95 (09/9)	100 (01/11)	
8	1972	110 (30/8)		
9	1973	131 (31/7)	147 (04/9)	85 (03/10)
10	1974	85 (02/3)		

Qual o tempo de recorrência de uma precipitação de 100 mm?
Faça a análise por séries anuais

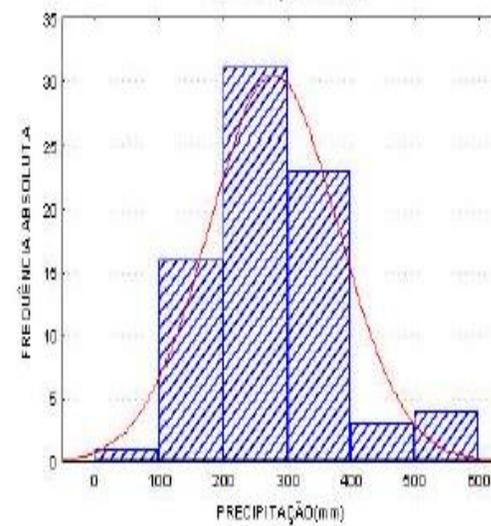
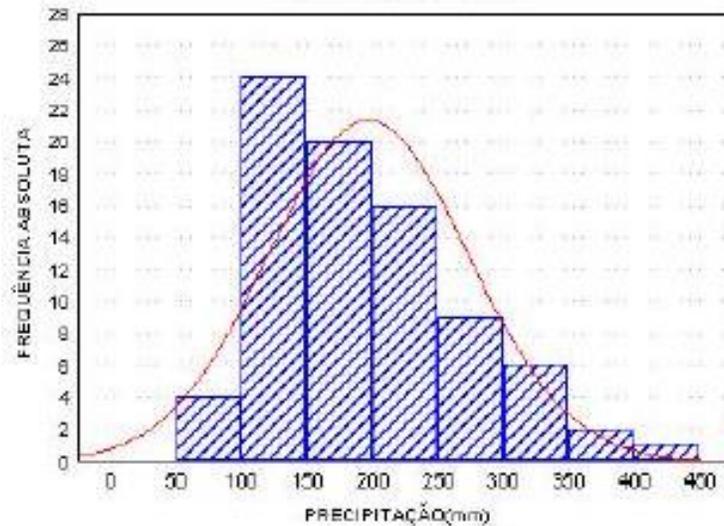
Problema prático: Como estimar uma chuva com um período de retorno de 10000 anos, se a série de dados de chuva é de 10, 20 ou 30 anos?

Para $T_r \ll$ número de anos de observação ($n \rightarrow$ infinito)

$F \rightarrow P$ (probabilidade real)

Para T_r maiores (menos freqüentes)

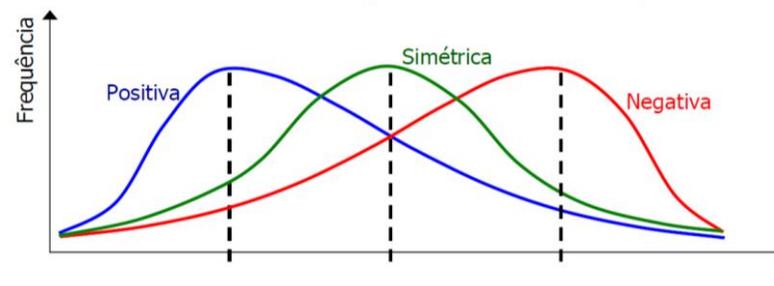
A repartição de frequência deve ser ajustada a uma lei probabilística teórica para cálculo mais correto da probabilidade



Ajuste das Distribuições Teóricas de Probabilidades

Para análise de dados de chuva:

- Distribuição Normal;
- Distribuição de Gumbel;
- Distribuição Exponencial;
- Distribuição Log-Normal;
- Outras.



Procedimento padrão:

- 1) Definir a série, por exemplo: Precipitação anual
- 2) Análise de consistência de dados (Investigação da homogeneidade dos dados: se todos os dados se referenciam a anos nos quais não ocorreram interferências importantes nas condições naturais, ou seja, se todos os elementos da amostra provêm de uma única e idêntica população)
- 3) Escolher a distribuição de probabilidades teórica a ser usada;
- 4) Verificar o ajuste da distribuição teórica em relação aos valores observados (Teste de aderência da distribuição de probabilidades adotada);
- 5) Utilizar a distribuição teórica ajustada para o cálculo da chuva com uma determinada probabilidade de ocorrência ou período de retorno.

Métodos de ajuste

5

Método Gráfico ou Empírico ou Amostral
Menos exato

Método dos Momentos
Mais usual

Método da Máxima Verossimilhança
Mais exato

Escolha da Distribuição de Probabilidades

5

Qual a melhor distribuição teórica?

Critério visual:

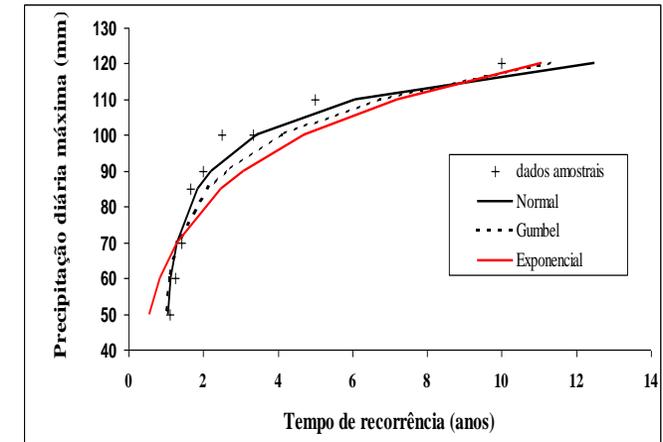
gráfico: frequências amostrais
x probabilidades teóricas

Índices de adequação de ajuste:

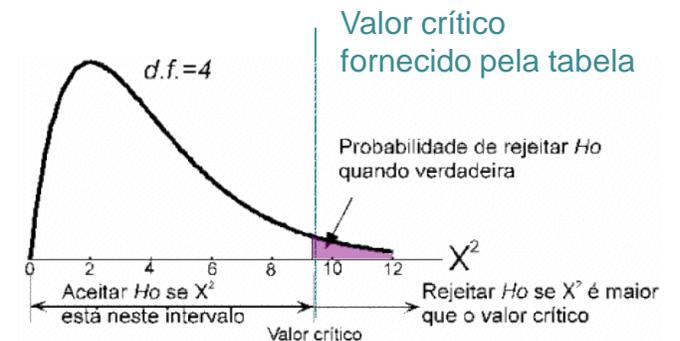
Testes do Qui-quadrado e
Kolmogorov-Smirnov

Critério de Robustez

Visual



Teste do Qui-quadrado



Exemplos

5

Totais anuais precipitados

Distribuição Normal

Chuvas máximas anuais

Distribuição Normal

Distribuição de Gumbel

Distribuição Exponencial

a) Freqüência de totais anuais

1

Teoria das Probabilidades

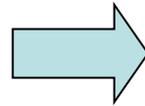
Teorema do limite central

Satisfeitas certas condições,

a soma de variáveis aleatórias \approx normalmente distribuída

(tende a seguir Lei de Gauss de distribuição de probabilidades)

Precipitação Total Anual
= Soma de totais diários



A distribuição de F se
aproxima da Lei de Gauss

$$F(z) = P[X \leq x_T] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2/2} du$$

$P[X \leq x_T]$ – probabilidade de um total anual qualquer ser inferior ou igual a x_T

x_T – uma determinada precipitação total anual, evento associado ao T_r

z – variável reduzida
(função linear de x)

$$z = \frac{x_T - \mu}{\sigma}$$

μ - média (do universo) \rightarrow média da amostra (x)

σ – desvio-padrão (do universo) \rightarrow desvio da amostra (S)

Valores tabelados de F(z)

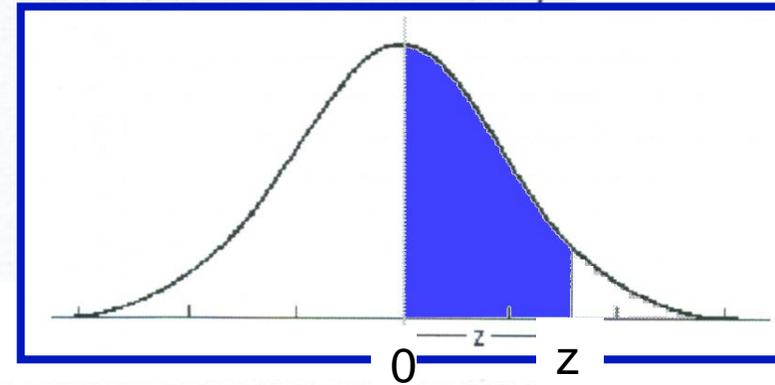
$$F(z) = P[X \leq x_T] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2/2} du$$

5

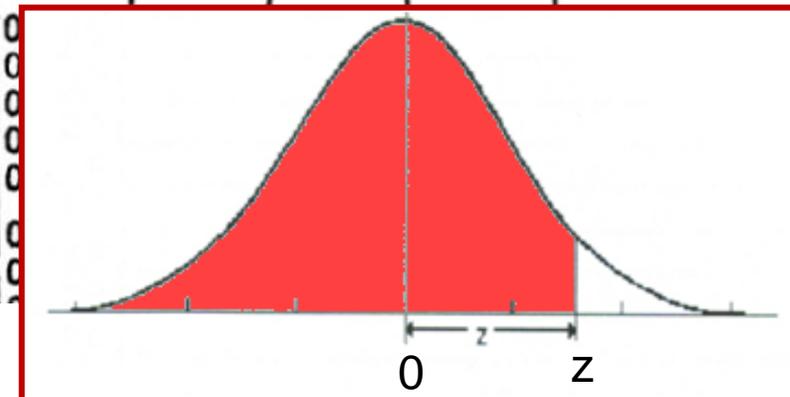
Área sob a curva Normal

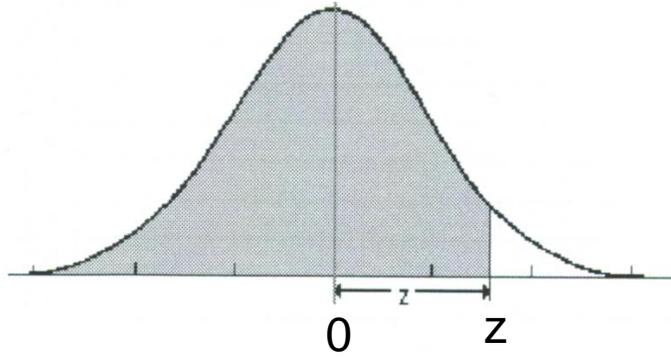
$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	,0000	,0040	,0080	,0120	,0160	,0199	,0239	,0279	,0319	,0359
0,1	,0398	,0438	,0478	,0517	,0557	,0596				
0,2	,0793	,0832	,0871	,0910	,0948	,0987				
0,3	,1179	,1217	,1255	,1293	,1331	,1368				
0,4	,1554	,1591	,1628	,1664	,1700	,1736				
0,5	,1915	,1950	,1985	,2019	,2054	,2088				
0,6	,2258	,2291	,2324	,2357	,2389	,2422				
0,7	,2580	,2612	,2642	,2673	,2704					

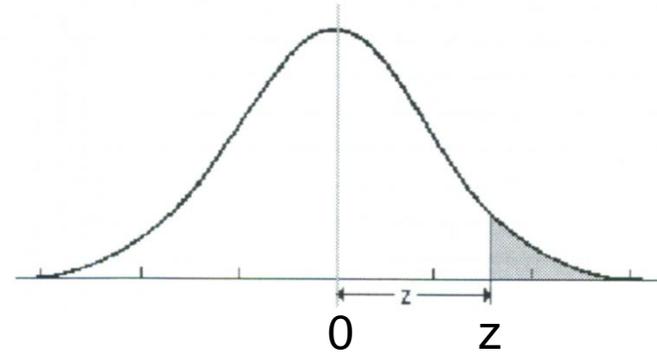


x	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199				
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596				
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987				
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368				
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736				
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088				
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422				
0,7	0,7580	0,7612	0,7642	0,7673	0,7704					





$$P[X \leq x_T] = F(z)$$



$$P[X \geq x_T] = 1 - F(z)$$

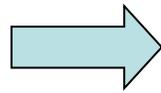
μ - média aritmética

σ - Desvio padrão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n-1}}$$

Como:

$$F(z) = P[X \leq x_T]$$



$$T_r = \frac{1}{P[X \geq x_t]} = \frac{1}{1 - F(z)}$$

Eventos extremos
máximos

$$T_r = \frac{1}{P[X \leq x_t]} = \frac{1}{F(z)}$$

Eventos extremos
mínimos

Ajuste da Lei de Gauss em forma gráfica

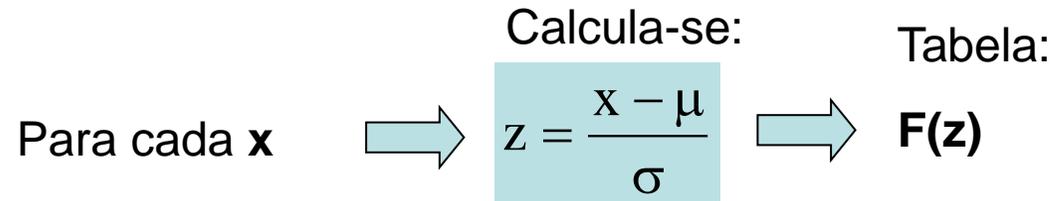
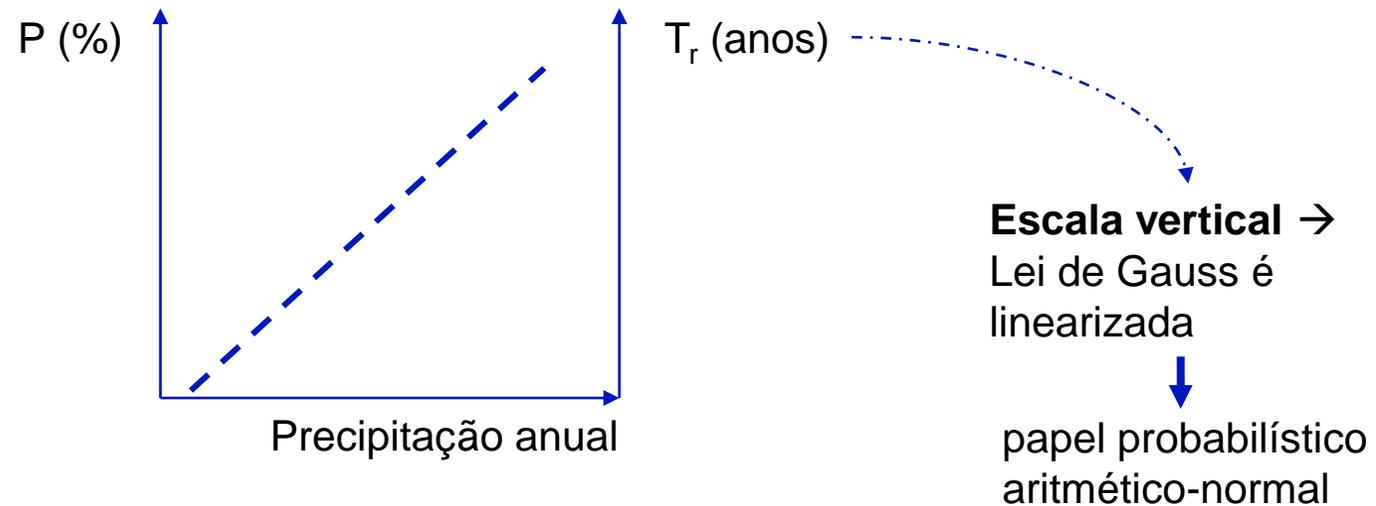
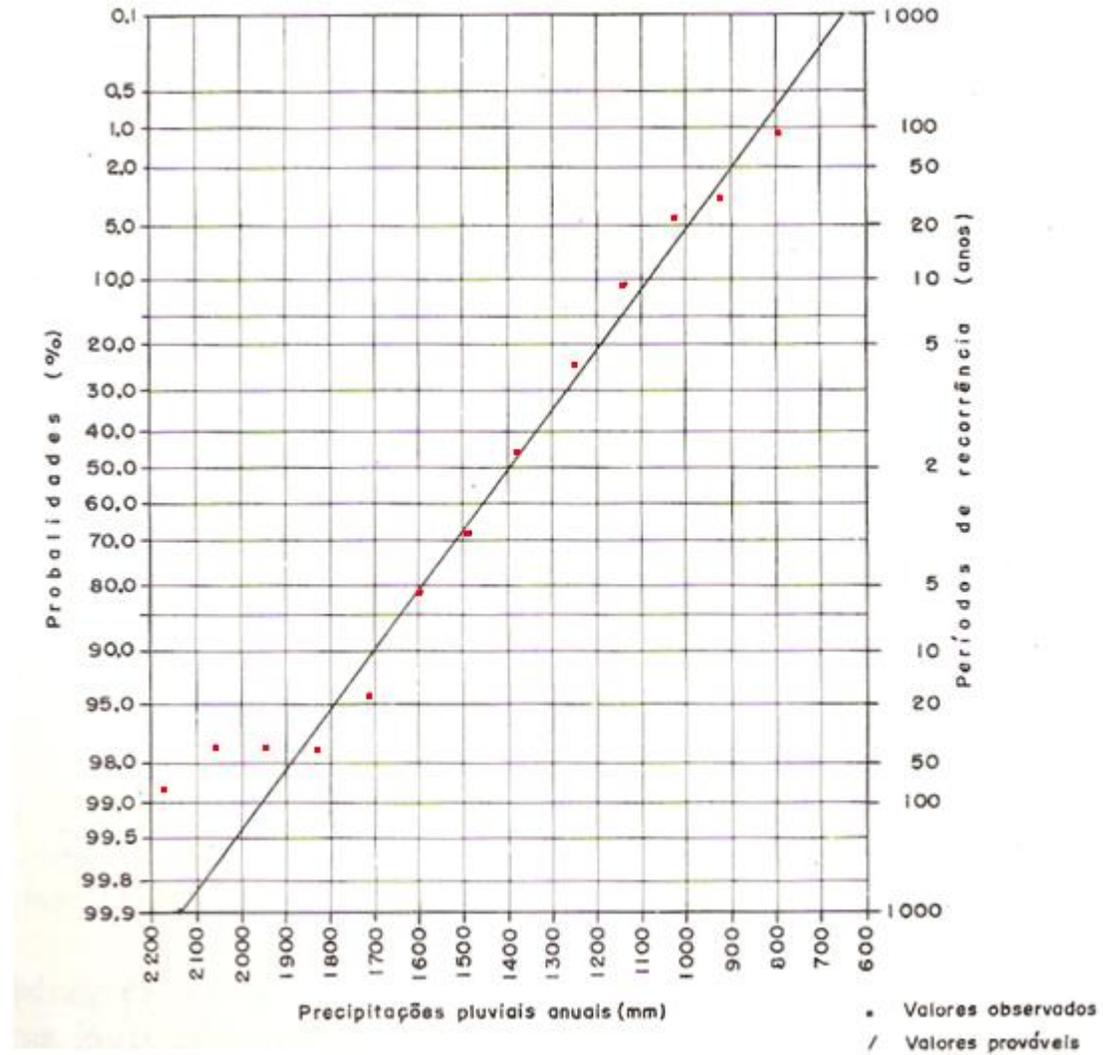


Gráfico:





Uso de papéis de probabilidade, pontos conhecidos de uma distribuição normal:

$$P[X=\mu] = F(0) = 50\%$$

$$P[X < (\mu - \sigma)] = F(-1) = 15,87\%$$

$$P[X < (\mu + \sigma)] = F(1) = 84,13\%$$

Reta passa por esses 3 pontos.

T(anos)	Probabilidade esperada (%)	
	Máxima	Mínima
2	50	50
5	80	20
10	90	10
20	95	5
50	98	2
100	99	1
1000	99,9	0,1
10000	99,99	0,01

Obs:

F(z)

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Exercício 5

FREQÜÊNCIA DE TOTAIS ANUAIS PRECIPITADOS

O quadro ao lado apresenta os totais anuais precipitados em Curitiba no período de 1949-1963.

- Qual a estimativa da probabilidade e do tempo de recorrência de se ter uma precipitação total **inferior** a 1000 mm em um ano qualquer?
- Determinar a precipitação que ocorrerá pelo menos uma vez a cada 100 anos.

Ano	P (mm)
1949	1234
1950	1470
1951	1190
1952	1386
1953	1267
1954	1730
1955	1462
1956	1197
1957	2165
1958	1432
1959	1205
1960	1630
1961	1683
1962	1167
1963	1408

b) Frequência de precipitações mensais e trimestrais

Interesse: conhecer a distribuição de **totais precipitados em intervalos menores que um ano**

Procedimento semelhante ao da Precipitação Anual:

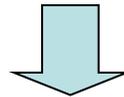
- Frequências avaliadas: Método da Califórnia ou de Kimbal

No entanto, **em geral**, a distribuição desses dados em torno da média é:

- Assimétrica e

- Não obedece a Lei de Gauss

Quando dados plotados no papel probabilístico aritmético-normal **não** apresentam tendência de se alinharem segundo uma reta



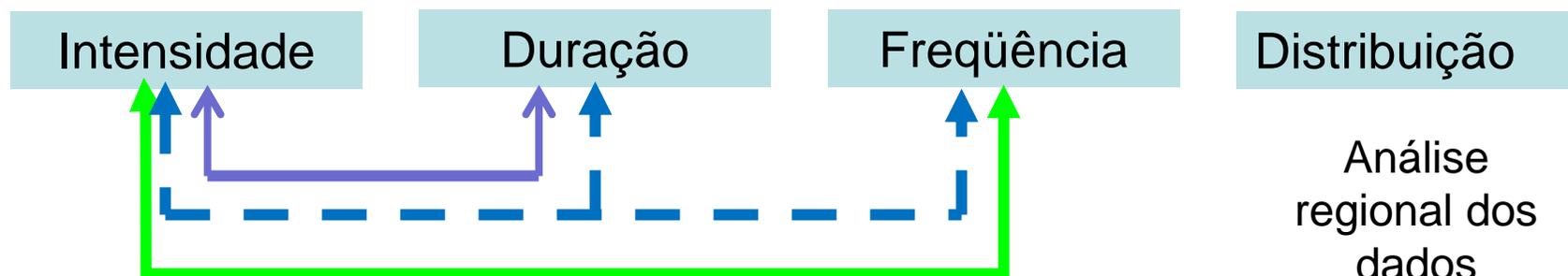
Procurar a distribuição adequada

c) Frequências de precipitações intensas de curta duração

5

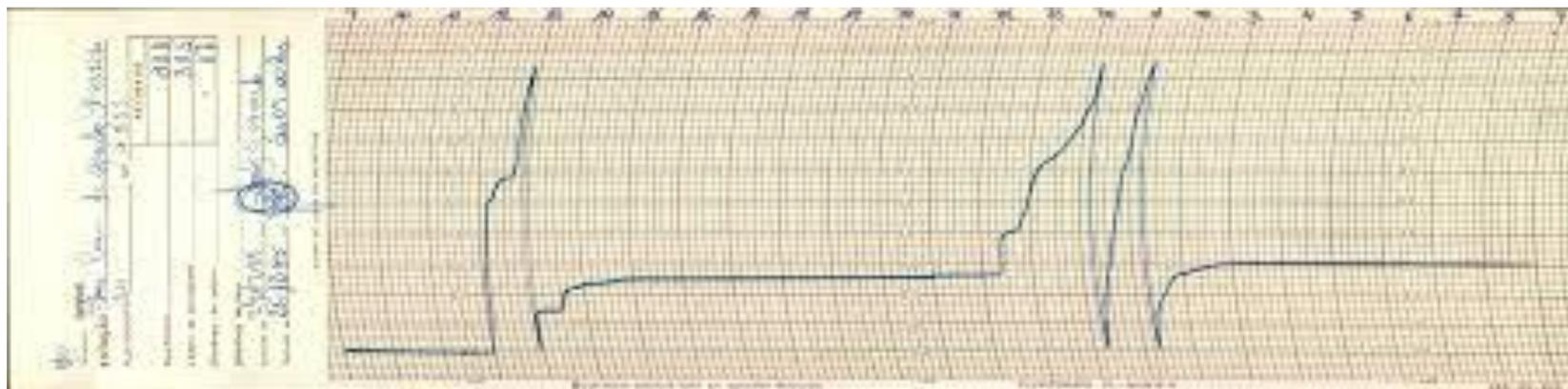
Não se aplica o teorema do limite central.
Outros métodos de análise devem ser aplicados.

Relação:



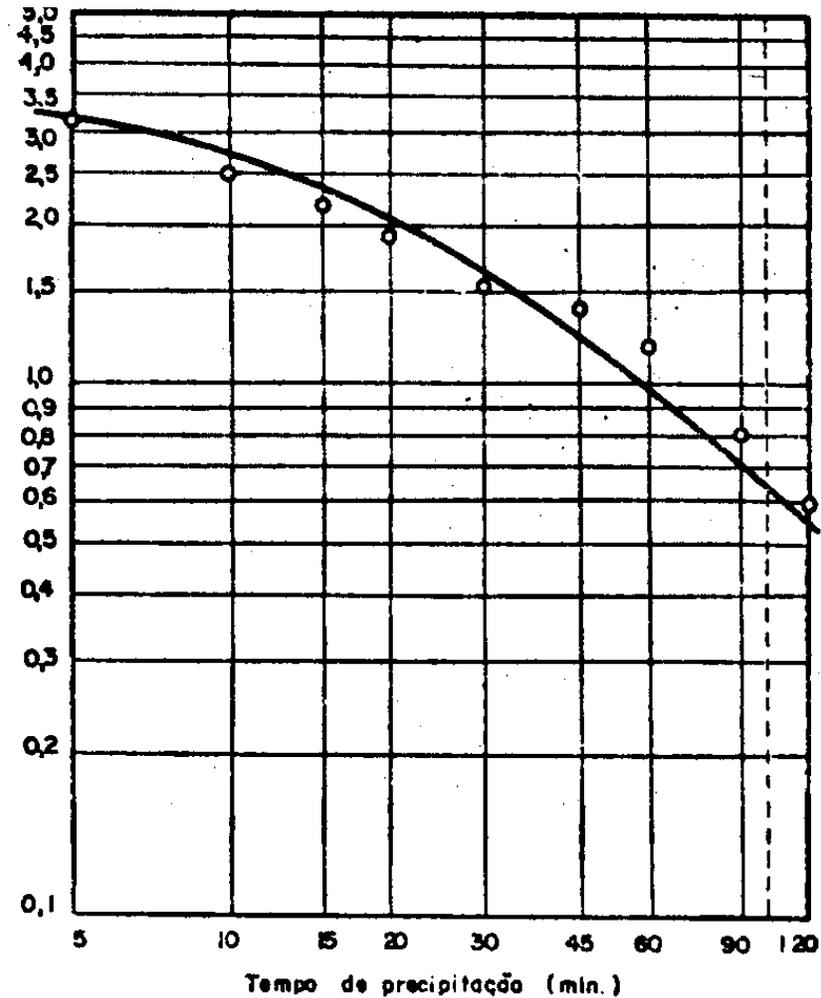
c.1) Intensidade-duração

- Dados necessários: dados com frequência menor de registro (Pluviogramas, por exemplo)
- Para diversas durações de chuva: as máximas intensidades ocorridas durante uma dada chuva
- Durações usuais:
 - 5, 10, 15, 30 e 45 min
 - 1, 2, 3, 6, 12, 24 h



Curvas de Intensidade e duração

5



Precipitações que ocorrem em Curitiba 3 vezes em 31 anos

Equação Intensidade-duração

5

Em geral:

$$i = \frac{C}{(t + t_0)^n}$$

i - intensidade média de chuva em mm por hora

t - duração em minutos

C , t_0 e n - constantes

c.2) Intensidade-freqüência

- Previsão das máximas precipitações que possam vir a ocorrer em uma localidade com determinada freqüência.
- Máximas intensidades médias prováveis de precipitações intensas.
- Máximas quantidades precipitadas em um ou mais dias consecutivos.

Em geral, as distribuições de **valores extremos** de grandezas hidrológicas, como a **chuva e vazão**, ajustam-se satisfatoriamente à **distribuição de Gumbel**:

$$P[X \geq x] = 1 - e^{-e^{-y}}$$

$$y = \frac{1}{0,7797\sigma} (X - \bar{X} + 0,45\sigma)$$

onde:

P = probabilidade de um valor extremo X ser maior ou igual a um dado valor x ;

T = período de retorno;

y = variável reduzida de Gumbel.

Gumbel será visto
em Cheias!

Tempo de retorno:

$$T_r = \frac{1}{P[X \geq x_T]}$$

O valor de y apresentado supõe uma amostra de tamanho infinito, mas na prática, geralmente há poucos anos de observação, assim, em vez daquela equação, usa-se:

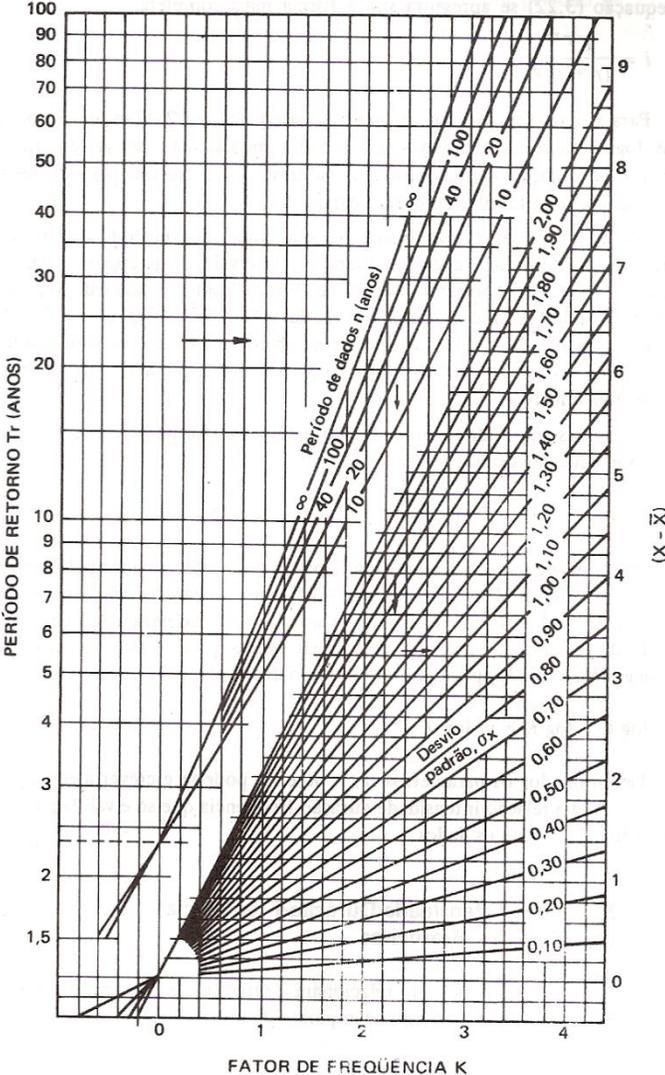
$$X = \bar{X} + k\sigma \quad \text{Ven Te Chow}$$

k = fator de frequência, que depende do tamanho da amostra e do período de recorrência (tabelado por Reid ou Weiss – baseados em Gumbel)

Papel de Gumbel – Plotar (X , T_r)

Gráfico de Weiss – para aplicação do Método de Gumbel

5



c.3) Intensidade-duração-frequência (IDF)

5

Em geral:

$$i = \frac{C}{(t + t_0)^n}$$

$$C = K.T_r^m$$

$$i = \frac{K.T_r^m}{(t + t_0)^n}$$

i - intensidade máxima média (mm/min.) para duração t ;

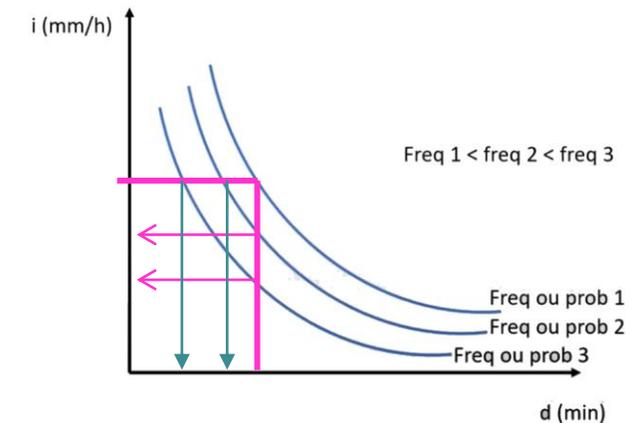
t_0 , m e n são parâmetros a determinar

K – fator de frequência

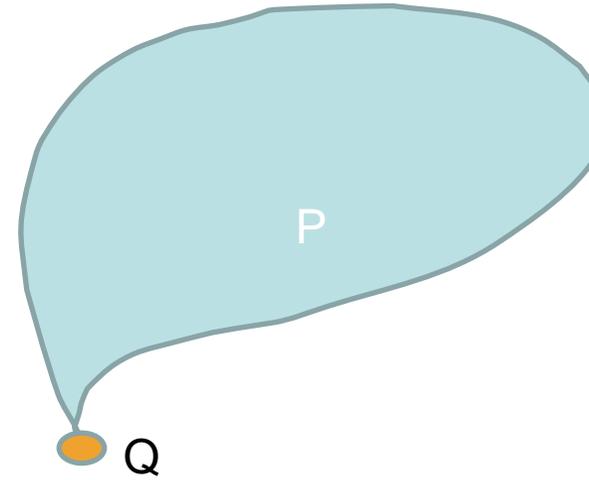
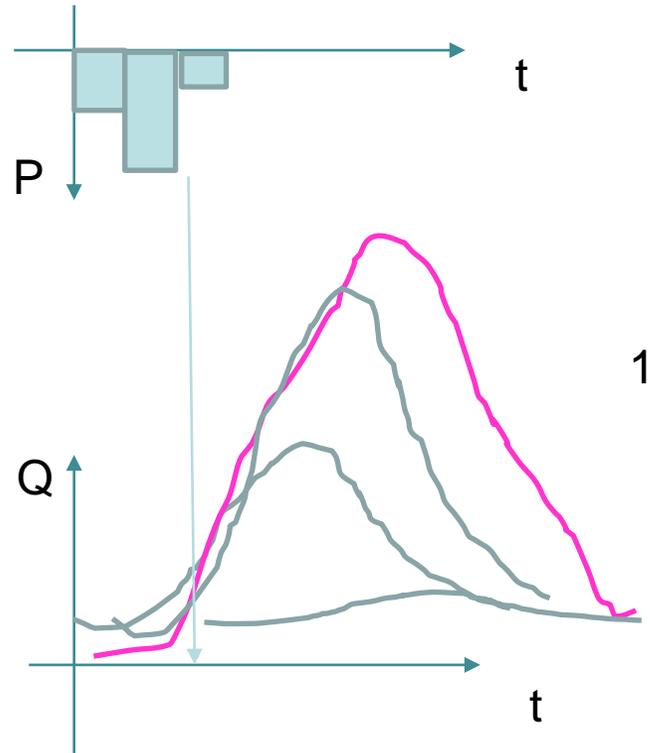
Observa-se

Quanto mais intensa uma chuva, menores a sua duração e frequência

Curva IDF



5



- 1 - Chuva começou na cabeceira e chegou até toda a bacia
- 2 - Chuva começou no exutório e chegou até toda a bacia

$$i = \frac{K \cdot T_r^m}{(t + t_0)^n}$$

$$\log i = (\log K + m \log T_r) - n \log (t + t_0)$$

$$\underbrace{\log i}_y = \underbrace{(\log K + m \log T_r)}_A - n \underbrace{\log (t + t_0)}_x$$

$$y = A + B x$$

n – coeficiente angular das retas;

m – espaçamento das curvas para vários T_r .

K – determina a posição vertical das linhas.

t_0 - valor constante que deve ser adicionado aos valores de t para que o conjunto de linhas levemente curvadas \rightarrow reto no papel bi logarítmico.

AJUSTE DAS CURVAS IDF PROCEDIMENTO

1. Para cada duração de chuva, seleção de eventos pela análise de pluviogramas de estações pluviométricas em estudo.
2. Para cada evento relativo a uma dada duração de chuva, cálculo da frequência amostral (e tempo de retorno)
3. Ajuste da expressão na sua forma linear, sendo:

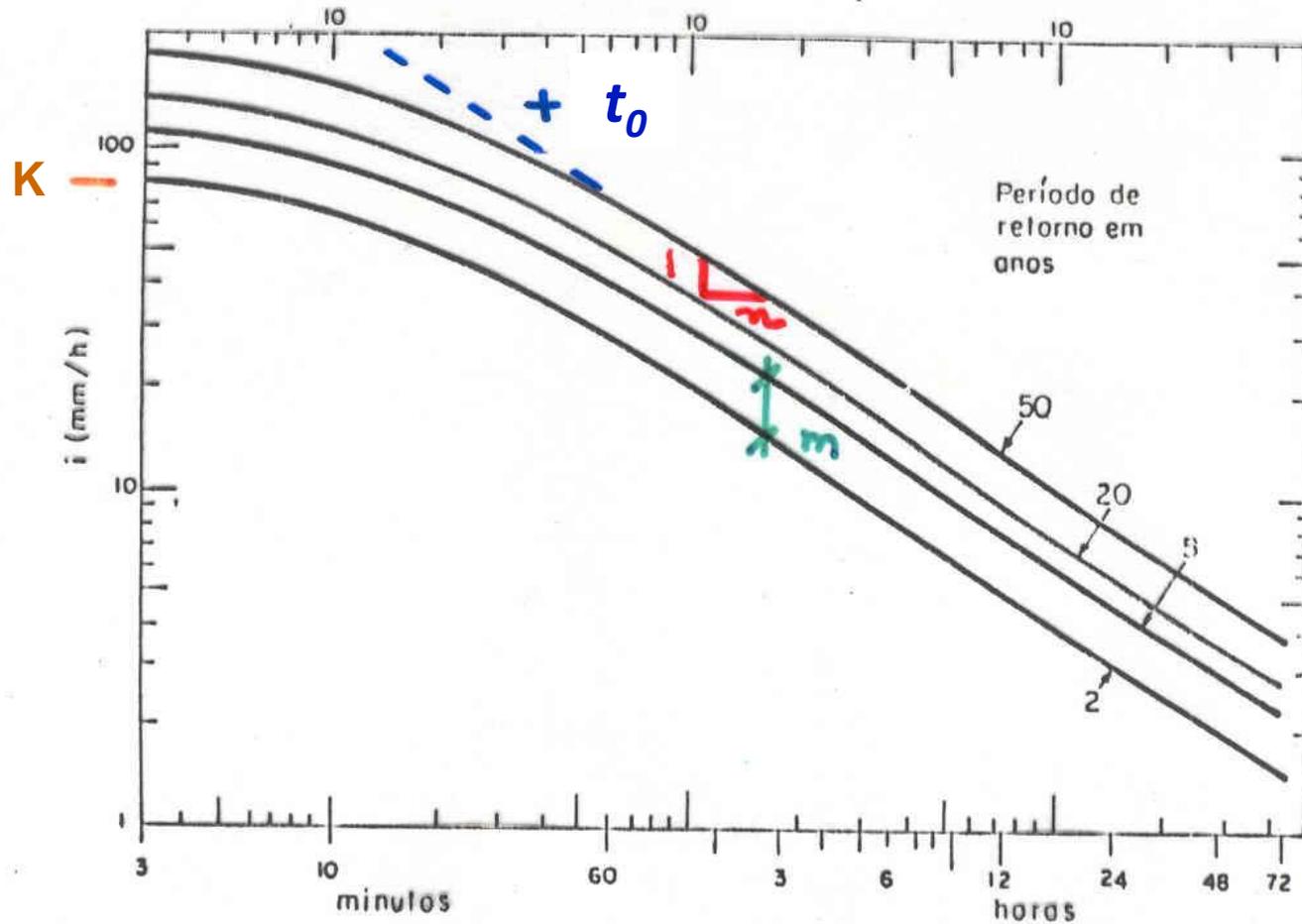
$i, t, T_r \rightarrow$ obtidos dos dados observados

n, m e $K \rightarrow$ obtidos do ajuste

$t_0 \rightarrow$ obtido por tentativa

$$i = \frac{K.T_r^m}{(t+t_0)^n}$$

5



Fonte: Roudkivi, 1979

Graficamente: curvas intensidade – duração parametrizadas em função do T_r .

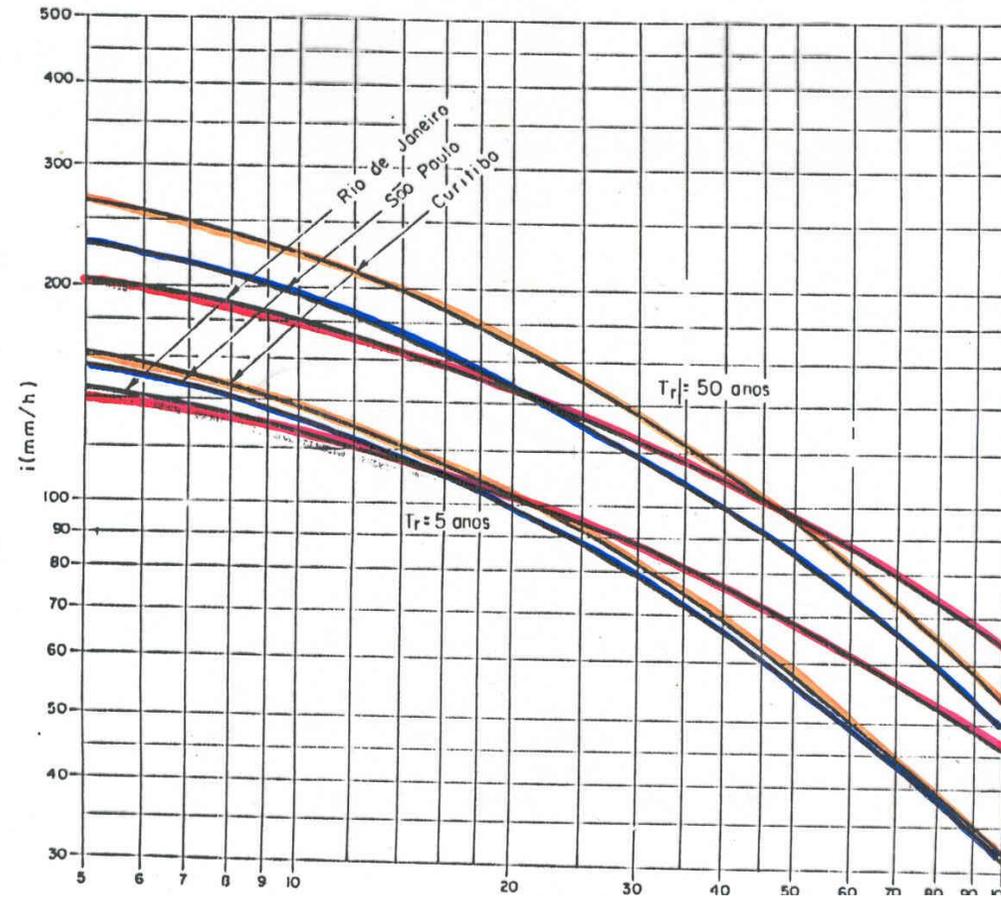
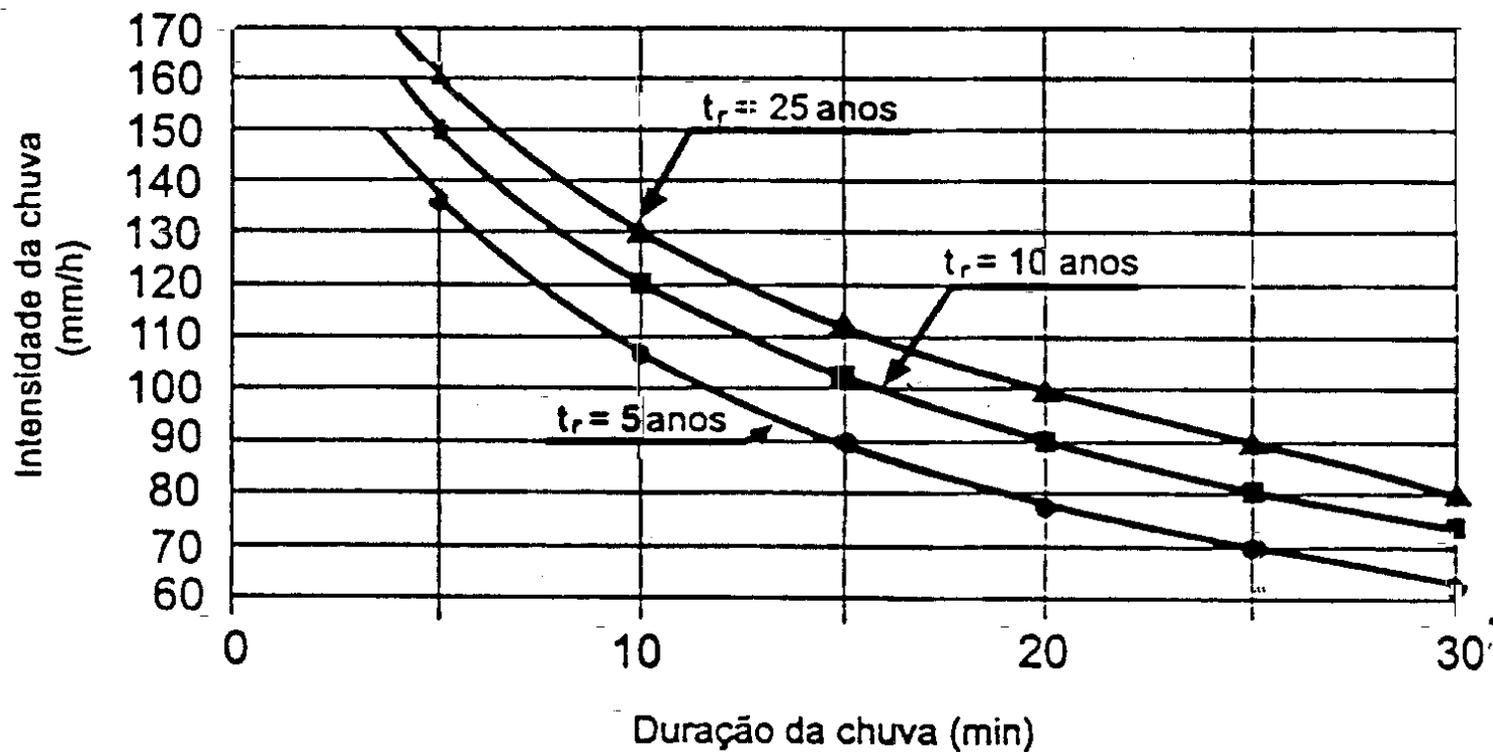


Gráfico Intensidade-duração-freqüência

5



Ábaco de chuvas intensas

Equações Intensidade-duração-freqüência

5

Para São Paulo
(eng. Paulo Sampaio Wilken)
25 anos (1935-1960)

$$i = \frac{3462,7.T_r^{0,172}}{(t + 22)^{1,025}}$$

Para Rio de Janeiro
(eng. Ulysses Alcântara)
33 anos (1922-1945;1949-1955;1958-1959)

$$i = \frac{1239.T_r^{0,15}}{(t + 20)^{0,74}}$$

Para Curitiba
(eng. Parigot de Souza)
31 anos (1921-1951)

$$i = \frac{5950.T_r^{0,217}}{(t + 26)^{1,15}}$$

Para $5 \leq t \leq 120$ min

i é a intensidade da chuva em mm/h, T_r é o período de retorno em anos e t é a duração da chuva em minutos

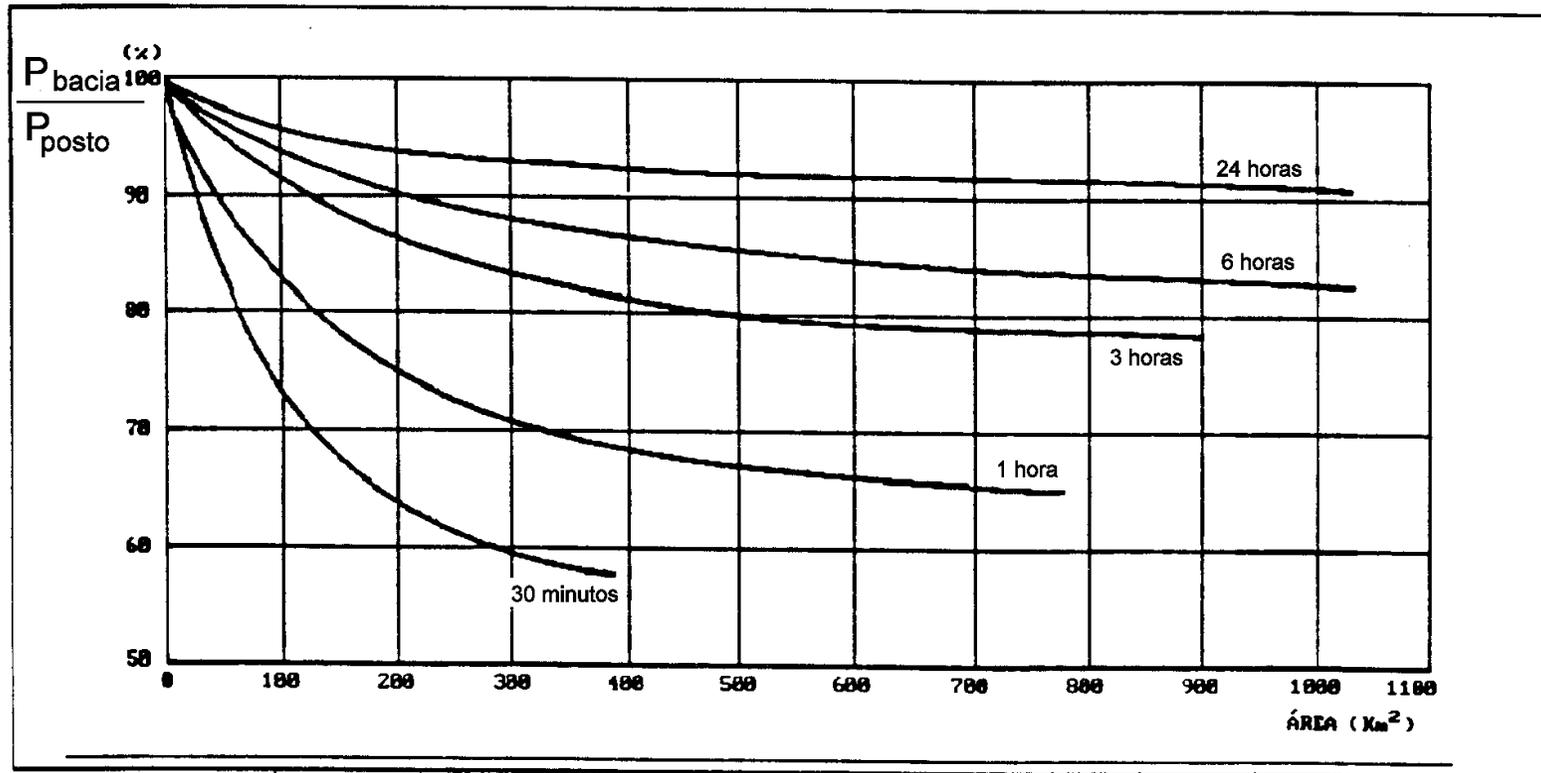
d) Frequência de dias sem precipitação

Objetivo: conhecer número máximo de dias consecutivos sem precipitação, que pode acontecer com dado T_r

- Contar número máximo de dias consecutivos sem chuva em cada ano (série anual)
- Ordenar em ordem decrescente
- Estimar frequência: $f = m/(n+1)$
- Estimar $T_r = 1/f$
- Plotar
 - (número máx de dias consecutivos sem chuva) $\times T_r$

e) Variação das precipitações com a área

5



A relação entre a chuva média na área e a chuva num ponto tende a diminuir à medida que a área cresce.

Ábaco do U.S Weather Bureau

4.10 - Obras hidráulicas e T_r

Barragens	1.000 a 10.000 anos
Galerias de águas pluviais	5 a 10 anos
Canais em terra	10 anos
Pontes e bueiros mais importantes, e que dificilmente permitirão ampliações futuras	25 anos
Obras em geral em pequenas bacias urbanas	5 a 50 anos

Tabela Tucci et al (1995)

Tipo da obra	Ocupação do solo	T(anos)
Microdrenagem	Residencial	2
	Comercial	5
	Áreas com edifícios de serviço público	5
	Aeroportos	2-5
	Áreas Comerciais e Artérias de Tráfego	5-10
Macro-drenagem	Áreas Comerciais e Residenciais	50-100
	Áreas de Im	500-

Exercício

5

M1.47. Um episódio pluvial, compatível com a equação abaixo, ocorreu entre 9:00 h e 9:40 h. Determinar os valores de **x** (quando choveu entre 9:00 h e 9:10 h), **y** (quando choveu entre 9:10 h e 9:20 h), **z** (quando choveu entre 9:20 h e 9:30 h) e **w** (quando choveu entre 9:30 h e 9:40 h), sabendo que **y > x > z > w**.

(1º.TE/1990/FG)

$$i = \frac{9800}{(t + 26)^{1,15}} \quad (\mathbf{i} \text{ em mm/h e } \mathbf{t} \text{ em minutos})$$

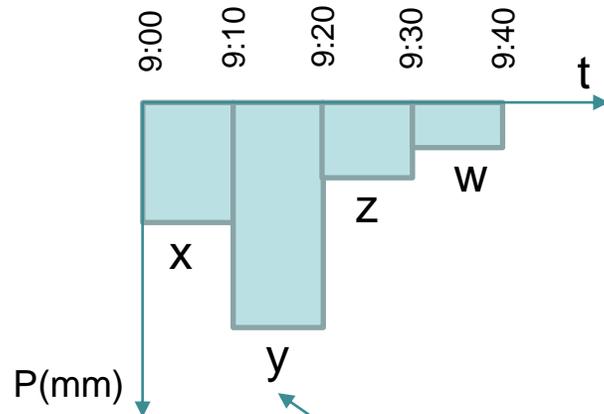
Exercício - Solução

5

SOLUÇÃO

M1.47. Um episódio pluvial, compatível com a equação abaixo, ocorreu entre 9:00 h e 9:40 h. Determinar os valores de **x** (quando choveu entre 9:00 h e 9:10 h), **y** (quando choveu entre 9:10 h e 9:20 h), **z** (quando choveu entre 9:20 h e 9:30 h) e **w** (quando choveu entre 9:30 h e 9:40 h), sabendo que $y > x > z > w$. (1ª.TE/1990/FG)

$$i = \frac{9800}{(t + 26)^{1,15}} \quad (i \text{ em mm/h e } t \text{ em minutos})$$



Forma tabular:

Duração t (mm)	i (mm/h)	P _{acum} = i t (mm)	ΔP (mm)
10	159,03	26,5	26,5
20	119,96	40,0	13,5
30	95,67	47,8	7,8
40	79,20	52,8	5,0

Intensidade da chuva com duração t:

$$i_{10} = \frac{9800}{(10 + 26)^{1,15}} = 159,03 \text{ mm/h} \Rightarrow$$

$$P_{10} = 159,03 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \times 10 \text{ min} \frac{1\text{h}}{60\text{min}}$$

$$P_{10} = 26,5 \text{ mm} = y$$

$$i_{20} = \frac{9800}{(20 + 26)^{1,15}} = 119,96 \text{ mm/h} \Rightarrow$$

$$P_{20} = 119,96 \frac{20}{60} = 40 \text{ mm} = x + y$$

$$x = 40 - 26,5 = 13,5 \text{ mm}$$

$$i_{30} = \frac{9800}{(30 + 26)^{1,15}} = 95,67 \text{ mm/h} \Rightarrow$$

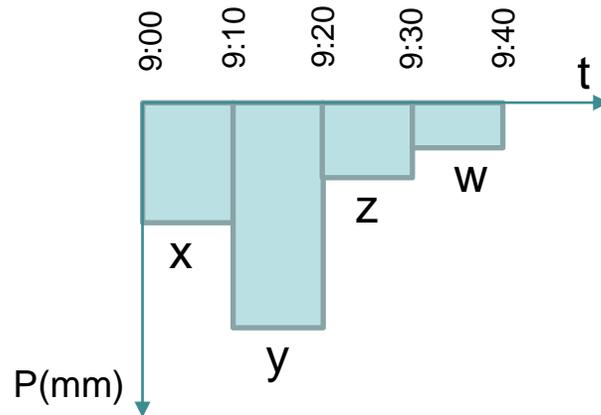
$$P_{30} = 47,8 \text{ mm} = x + y + z$$

$$z = 7,8 \text{ mm}$$

$$i_{40} = \frac{9800}{(40 + 26)^{1,15}} = 79,20 \text{ mm/h} \Rightarrow$$

$$P_{40} = 52,8 \text{ mm} = x + y + z + w$$

$$w = 5 \text{ mm}$$



Forma tabular:

Duração t (mm)	i (mm/h)	$P_{\text{acum}} = i t$ (mm)	ΔP (mm)	Ordem do enunciado	P rearranjado (mm)
10	159,03	26,5	26,5	2º	13,5
20	119,96	40,0	13,5	1º	26,5
30	95,67	47,8	7,8	3º	7,8
40	79,20	52,8	5,0	4º	5,0

Hietograma completamente adiantado

Exercício

5

Definir uma chuva de projeto de 40 minutos na RMC, com período de retorno de 5 anos, em intervalos de 5 minutos. Construa o hietograma pelo método dos blocos alternados sugerido pelo [Manual de Drenagem Urbana – Região Metropolitana de Curitiba – PR](#) (item 7.1.1.3).

Duração t (mm)	i (mm/h)	$P_{\text{acum}} = i t$ (mm)	ΔP (mm)	Ordem rearranjada	P rearranjado (mm)
5					
10					
15					
20					
25					
30					
35					
40					

Exercício

5

Definir uma chuva de projeto de **40 minutos** na **RMC**, com **período de retorno de 5 anos**, em intervalos **de 5 minutos**. Construa o hietograma pelo método dos blocos alternados sugerido pelo [Manual de Drenagem Urbana – Região Metropolitana de Curitiba – PR](#) (item 7.1.1.3).

Duração t (mm)	i (mm/h)	P _{acum} = i t (mm)	ΔP (mm)	Ordem rearranjada	P rearranjado (mm)
5					
10					
15					
20					
25					
30					
35					
40					

Hietograma completamente adiantado

Método dos blocos alternados:

hietograma rearranjado por ordenação alternada é obtido posicionando o pico de forma centralizada e cada bloco de chuva do hietograma adiantado (na ordem decrescente) é alternado sucessivamente no entorno do bloco de pico, à direita e à esquerda, resultando em uma chuva que cresce gradativamente sua intensidade atingindo seu pico na metade de sua duração e depois vai reduzindo também gradativamente.

Estação Prado Velho (Fendrich, 1989)

i é a intensidade da chuva em mm/h, T é o período de retorno em anos e t_d é a duração da chuva em minutos

$$i_{\text{máx}} = \frac{3221,07 T^{0,258}}{(t_d + 26)^{1,010}}$$

Referências bibliográficas

5

- Villela & Mattos. 1975. Hidrologia Aplicada. São Paulo: McGrawHill.
- Pinto et al. 1976. Hidrologia Básica. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda.
- Fill, H.D. & Mine, Miriam. 1989. Hidrologia. Notas de aulas, cap. 3, Curso de Pós-graduação em Engenharia Hidráulica.
- Mauad & Wendland. Hidrologia e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia de São Carlos.
- Naghettini & Andrade Pinto. 2007. Hidrologia estatística. CPRM. Download gratuito do livro: <http://www.cprm.gov.br/>