



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA

® **M** Plataforma Moretti

Disciplina: Fundamentos de Hidrologia, Irrigação e Drenagem

# UNIDADE 2 – Precipitação pluviométrica

**Prof. Jorge Luiz Moretti de Souza**

E-mail: [jmoretti@ufpr.br](mailto:jmoretti@ufpr.br)

<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/index.htm>

# 1 FORMAS E TIPOS DE PRECIPITAÇÃO

- Definição;
- Estudo das formas de ocorrência e distribuição da precipitação
- Precipitação sob a forma de chuva (Brasil)

## 1.1 Classificação das precipitações

- Convectivas
- Orográficas
- Frontais ou ciclônicas
  - Frente quente
  - Frente fria

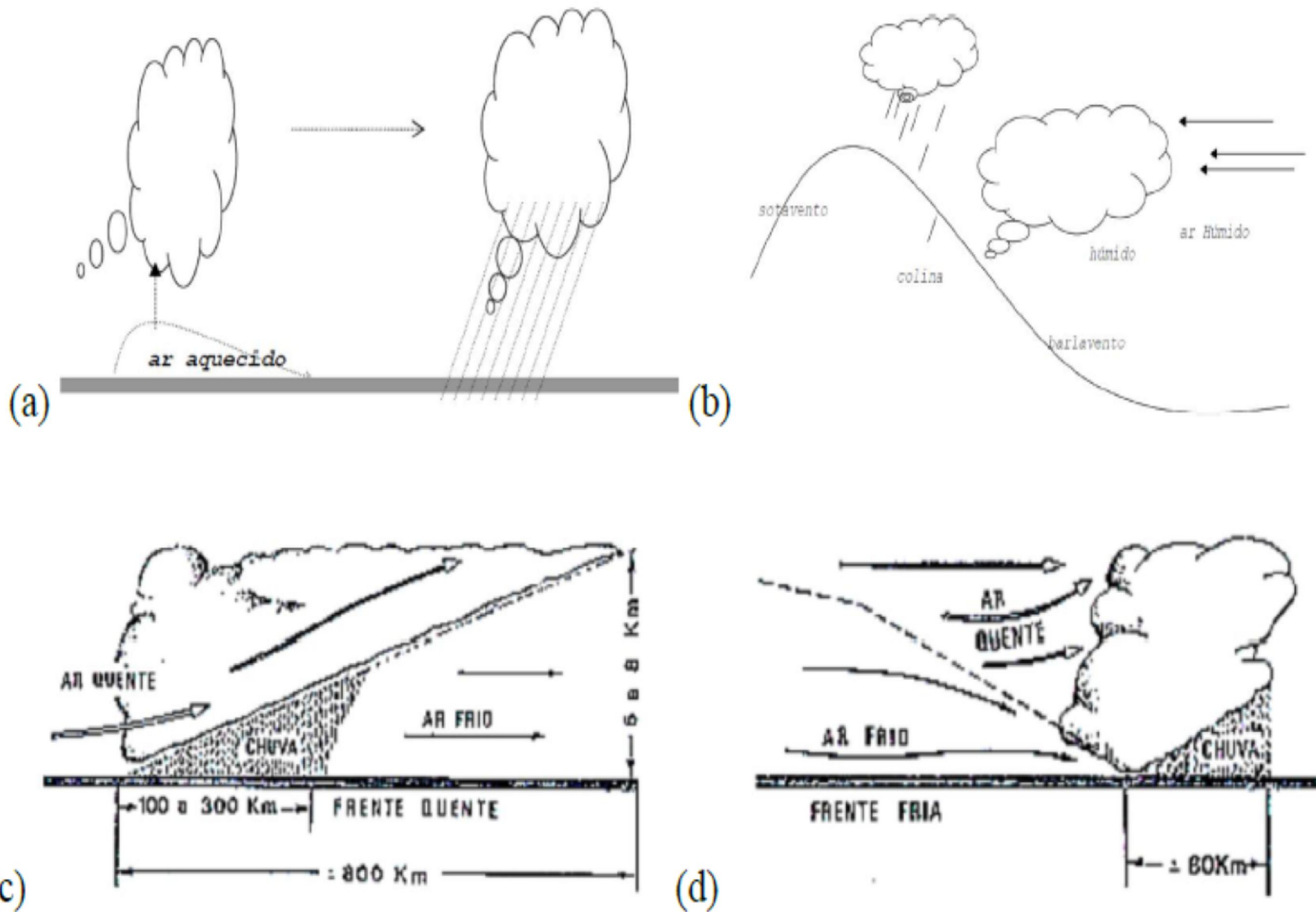


Figura 2.1 – Tipos de precipitação: (a) convectivas; (b) orográficas; (c) Ciclônica frontal: frente quente; e, (d) Ciclônica frontal: frente fria.

## 2 MEDIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

a) **Altura pluviométrica ( $h$  ou  $P$ ):** medida em “mm”; pluviômetro;

**Exemplo 2.1** – Comprovar que a altura de 1 mm equivale a  $1 \text{ L m}^{-2}$ .

$$1 \text{ m}^3 \text{ de água} = 1000 \text{ L de água} \quad \rightarrow \quad 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}^2 = 1000 \text{ L}$$

$$1000 \text{ mm} \cdot 1 \text{ m}^2 = 1000 \text{ L} \quad \rightarrow \quad 1 \text{ mm} \cdot 1 \text{ m}^2 = 1 \text{ L}$$

Logo,  $1 \text{ mm} = 1 \text{ L m}^{-2}$

**Exemplo 2.2** – Uma lâmina de 20 mm de chuva equivale a quantos  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ?

$$20 \text{ mm} = 20 \text{ L m}^{-2}$$

Como  $1 \text{ ha} = 10000 \text{ m}^2$  e  $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$ , tem-se:

$$20 \text{ mm} = 20 \cdot \frac{\text{m}^3}{1000} \cdot \frac{10000}{\text{ha}} = 20 \cdot 10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} = 200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$$

Logo, para passar de mm ou  $\text{L m}^{-2}$  para  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$  basta multiplicar o valor por 10.

## 2 MEDIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

**b) Duração (  $t$  ):** medida em minuto ou hora;

**c) Intensidade (  $i$  ):** medida em “mm h<sup>-1</sup>” ou “mm min.<sup>-1</sup>”; pluviógrafo;

**Exemplo 2.3** – Determine a intensidade de precipitação ( $i$ ) de uma chuva  $P = 56$  mm que ocorreu ao longo de 4 horas.

$$i = \frac{P}{t} = \frac{56}{4} = 14 \text{ mm h}^{-1}.$$

**d) Frequência da precipitação (  $f_p$  ):**

**Exemplo 2.4** – Ao longo de um ano ocorreu em Curitiba 25 precipitações ( $P$ ) que ficaram dentro do intervalo de classe  $10 \leq P < 20$  mm. Determinar a frequência de precipitação ( $f_p$ ) do ano considerado, sabendo que houve a ocorrência de 120 dias de precipitação.

$$f_p = \frac{n_i}{N} = \frac{25}{120} = 0,2083 \text{ ou } 20,83\%. \text{ Assim, } 20,83\% \text{ das chuvas diárias que}$$

ocorreram em Curitiba, ficaram entre  $10 \leq P < 20$  mm.

## 2.1 Instrumentos para medição da precipitação

### 2.1.1 Pluviômetros

➤ Funil com superfície receptora de 200 a 500 cm<sup>2</sup>;

#### a) Pluviômetros ordinários

➤ Principais modelos: Helmann e *Ville de Paris*

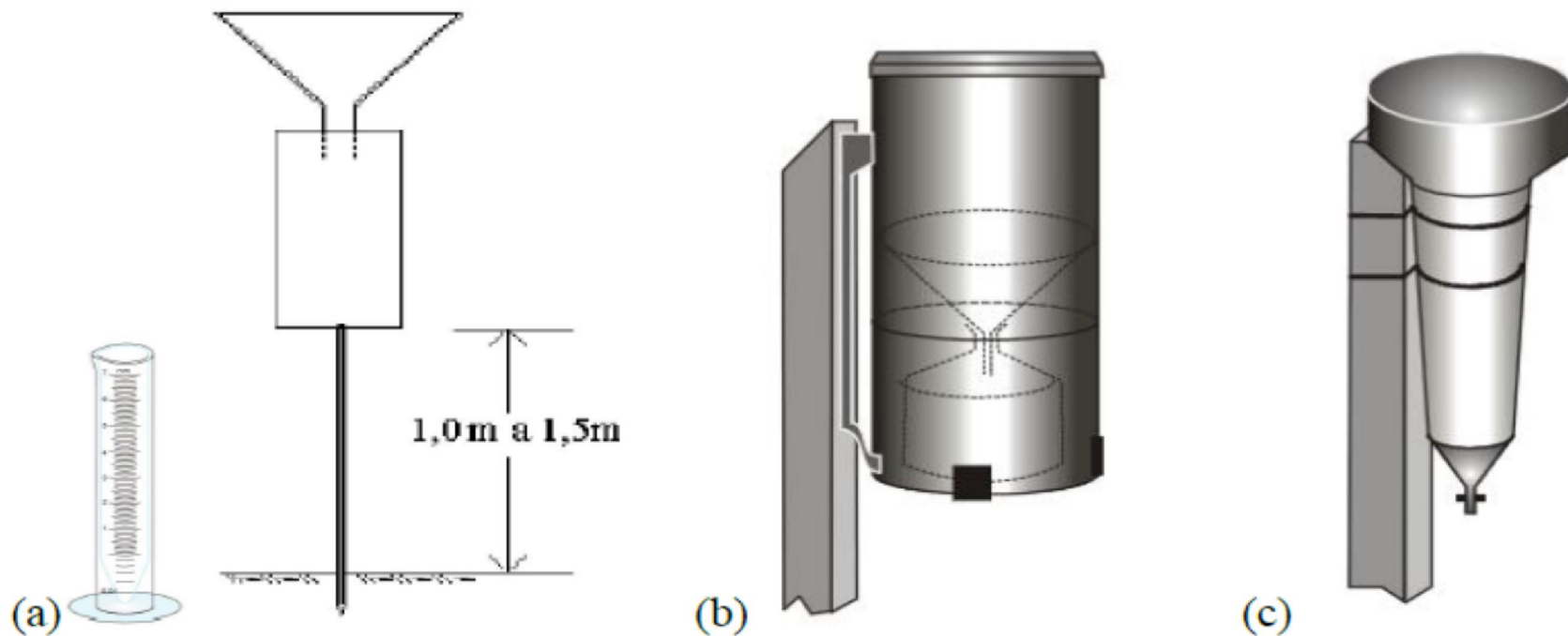


Figura 2.2 – Pluviômetros ordinários: (a) Representação esquemática de um pluviômetro instalado e proveta graduada; (b) Pluviômetro de Helmann; (c) Pluviômetro *Ville de Paris*.

## 2.1.1 Pluviômetros

### a) Pluviômetros ordinários

- Periodicidade e horário das medidas;
- Proveta para medida das leituras;
- Experimentos com grande número de pluviômetros;

$$P_i = 10 \cdot \frac{V_i}{A_i}$$

Sendo:  $P_i$  – altura de precipitação de um  $i$ -ésimo pluviômetro (mm);  $V_i$  – volume de água captada no  $i$ -ésimo pluviômetro (ml);  $A_i$  – área de captação do  $i$ -ésimo pluviômetro (cm<sup>2</sup>).



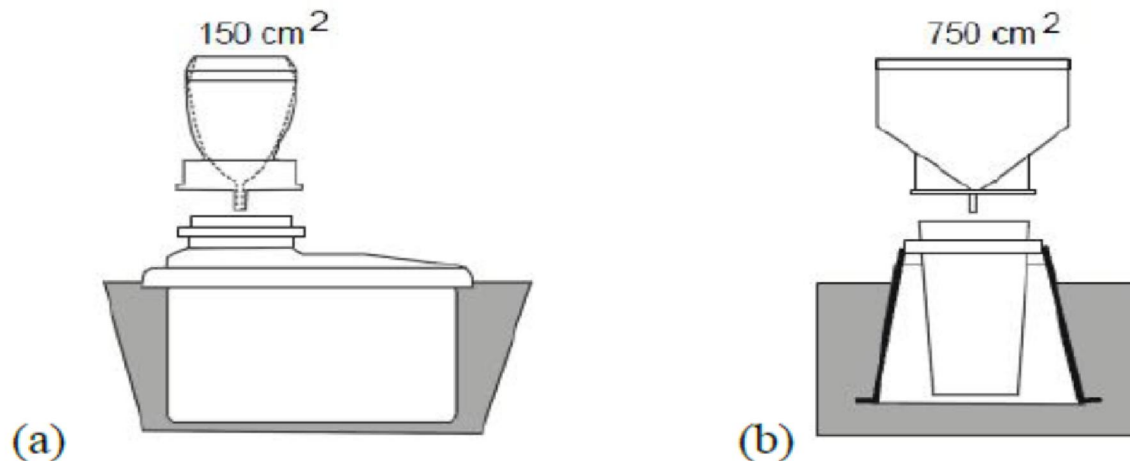
Figura 2.3 – Pluviômetro alternativo feito com garrafa PET de água mineral (1,5 L), testado por Souza et al. (2013)

**Exemplo 2.5** – Em um dos pluviômetros alternativos instalados em área experimental, contendo área  $A_i = 62,1 \text{ cm}^2$ , foi coletado volume de 250 ml de água após uma chuva. Determine a altura de precipitação que ocorreu.

$$P_i = 10 \cdot \frac{V_i}{A_i} = 10 \cdot \frac{250}{62,1} = 40,26 \text{ mm}$$

## b) Pluviômetros totalizadores

➤ Medidas das leituras: Proveta graduada; Régua; e, Pesagem;



**Figura 2.4** – Pluviômetros totalizador com coletor intercambiável com captação de: a)  $150 \text{ cm}^2$ ; e, b)  $750 \text{ cm}^2$ .



## 2.1.2 Pluviógrafos

a) Pluviógrafo de bóia: Princípio de funcionamento

b) Pluviógrafo de balança: Princípio de funcionamento

c) Pluviógrafo basculante: Princípio de funcionamento

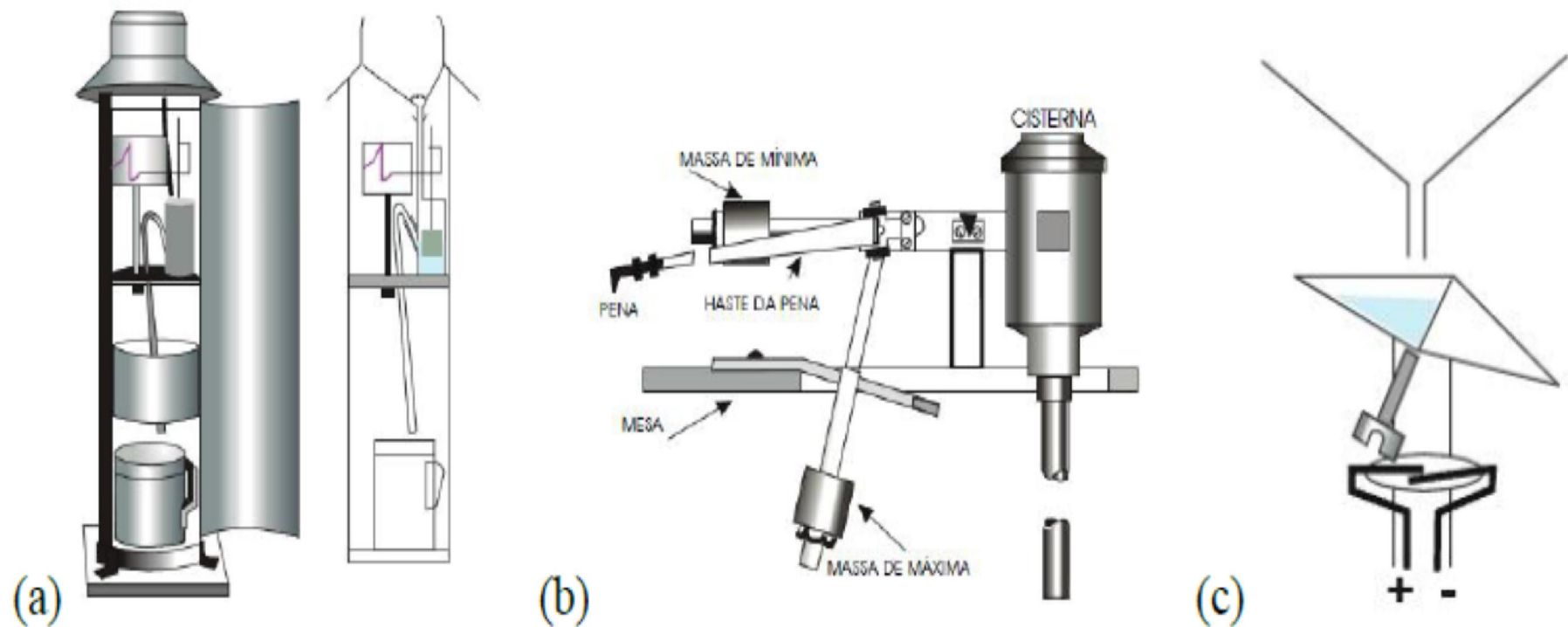


Figura 2.5 – Modelos de pluviômetros: a) Tipo bóia, com sistema de registro e acumulação da água; b) Tipo balança, com detalhe da unidade sensível; c) Tipo basculante, com detalhe da unidade sensível.

## 2.1.2 Pluviógrafos

- Medida e problemas no funcionamento;
- Pluviograma
- Hietograma.

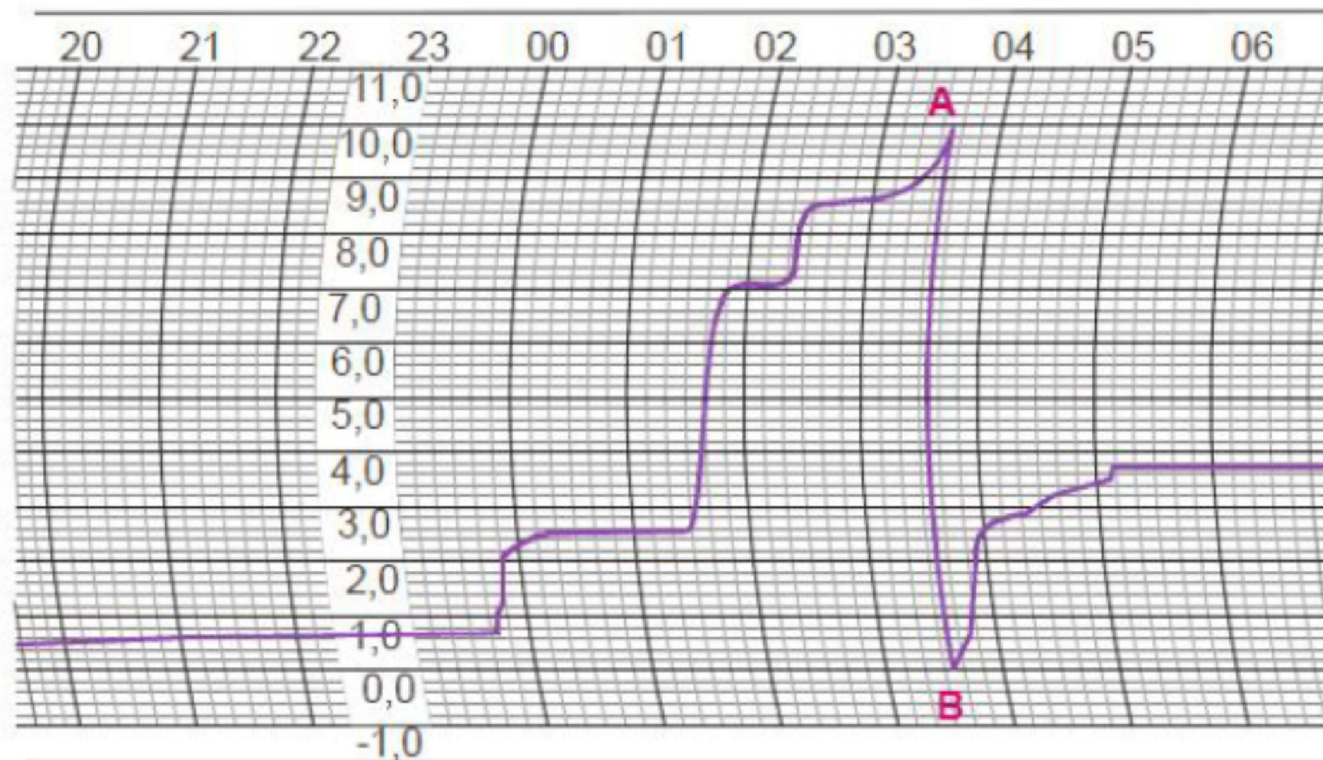


Figura 2.6 – Pluviograma: escala horizontal corresponde ao tempo; escala vertical graduada em milímetros pluviométricos; linha A-B corresponde à ocorrência de uma sifonagem (esvazamento do recipiente de armazenagem).

Exemplo 2.6 – Considerando o pluviograma da Figura 2.6, determine:

i) A precipitação que ocorreu entre as 2 e 4 horas.

– Conforme contabilização direta no pluviograma tem-se:  $P = 5,6$  mm, em 2 horas;

ii) a intensidade de precipitação ocorrida no período entre 2 e 4 horas.

Exemplo 2.7 – A partir do pluviograma da Figura 2.6 constituir o hietograma do período entre 0:00 à 6:00 h. A resposta encontra-se na Figura 2.7

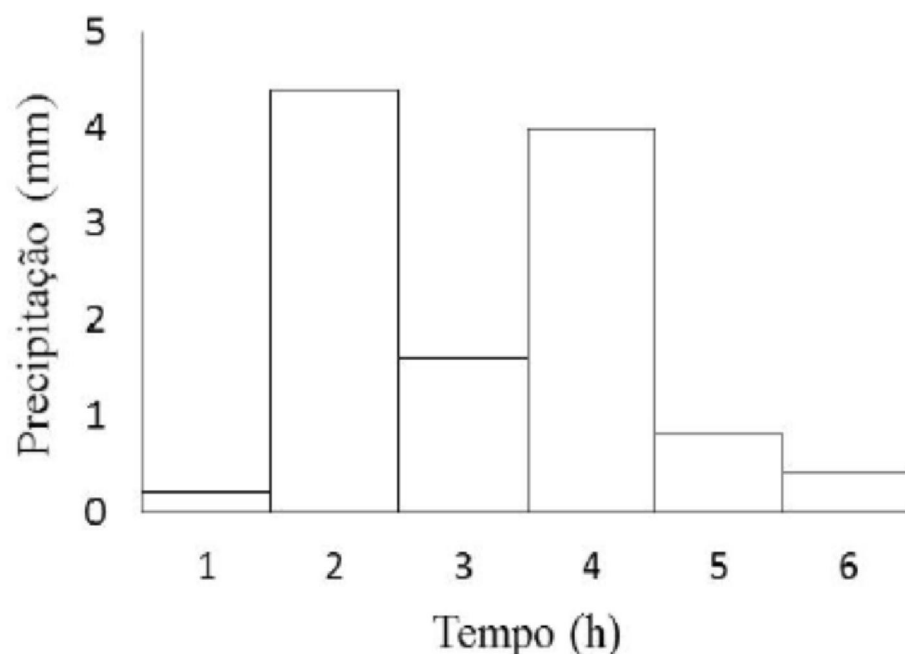


Figura 2.7 – Hietograma construído a partir dos dados coletados em um pluviograma (Figura 2.6).

## 2.1.3 Radares

- Em 1948 estabeleceu-se a primeira relação quantitativa entre medidas de radar e intensidade de precipitação em superfície.

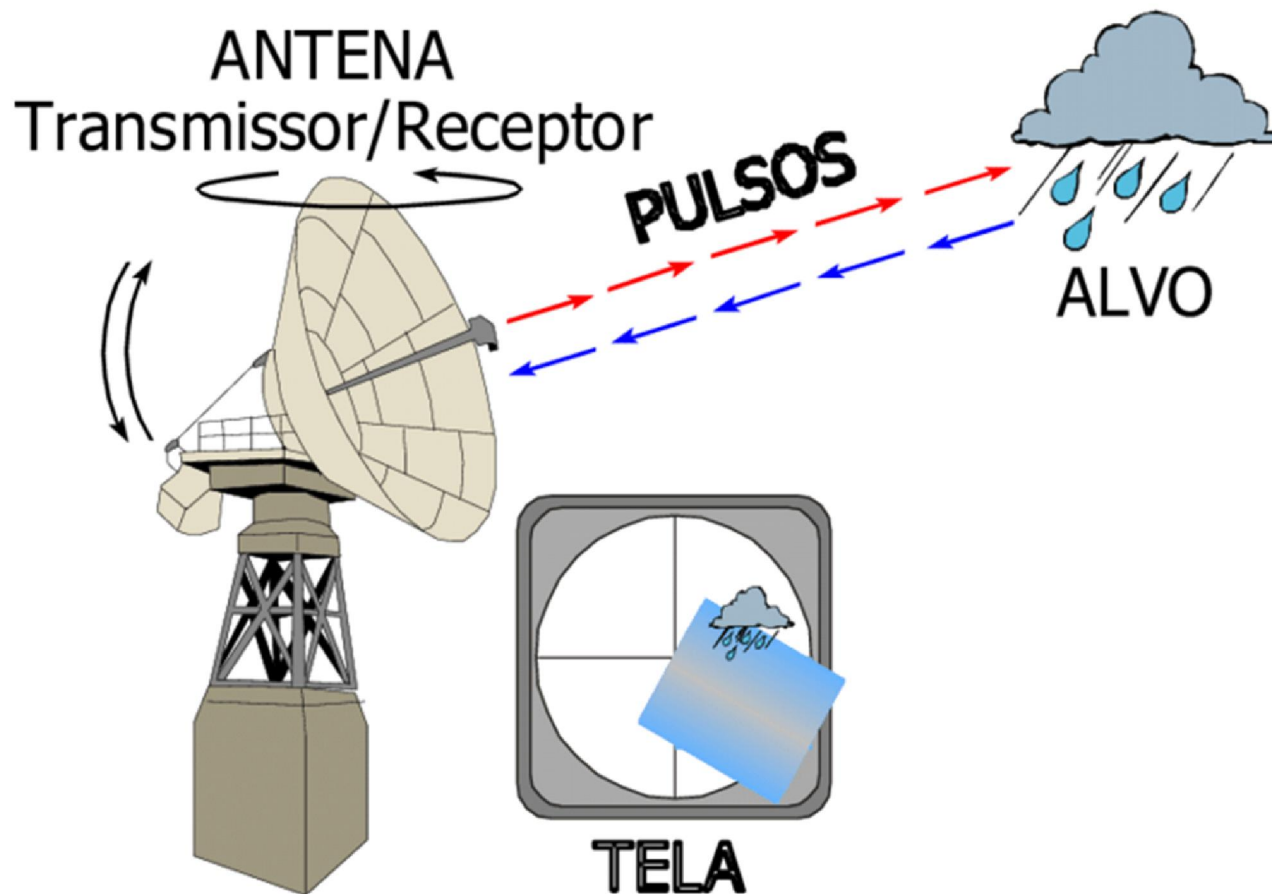


Figura – Radar meteorológico

### 3 TRATAMENTO DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

- Estação pluviométrica: coleta série de dados;
- Período com problema na série: sem informação; erros; falhas;
- Análise em série de dados:
  - i)* Detecção de erros grosseiros: dias inexistentes; e, valores anormais de precipitação:
    - Registros em dias que não existem (30 de fevereiro ou 31 de abril, por exemplo);
    - Registros de quantidades absurdas;
    - Erros de transcrição (preenchimento errado da caderneta de campo).
  - ii)* Preenchimento de falhas: defeito do aparelho ou ausência de observador.

## 3.1 Preenchimento de falhas de precipitação

### a) Método da média aritmética de estações vizinhas

$$Py = \frac{\sum_{i=1}^n Px_i}{n}$$

Sendo:  $Py$  – precipitação pluviométrica média da estação  $Y$  a ter a falha da série preenchida (mm),  $Px_i$  –  $i$ -ésima precipitação pluviométrica das  $X_i$  estações vizinhas, em regiões hidrologicamente homogêneas (mm);  $n$  – número de estações consideradas.

### b) Método da regressão linear

– Regressão linear simples (Figura 2.8)

$$Py = a_0 + a_1 Px$$

– Regressão múltipla

$$Py = a_0 + a_1 Px_1 + a_2 Px_2 + a_3 Px_3 + \dots + a_n Px_n$$

Sendo:  $Py$  – precipitação pluviométrica da estação  $Y$  a ter a falha na série preenchida (mm),  $Px_1, Px_2, \dots, Px_n$  –  $i$ -ésima precipitação pluviométrica das  $X_i$  estações vizinhas (mm);  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – coeficientes das equações.

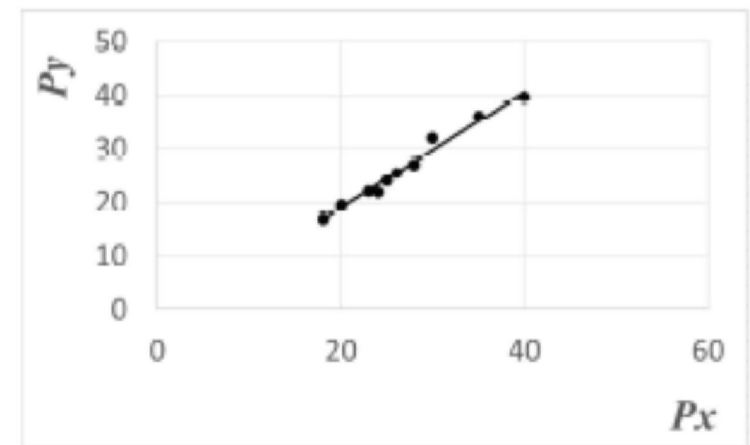


Figura 2.8 – Regressão linear

## 3.1 Preenchimento de falhas de precipitação

### c) Método da ponderação regional

$$P_y = \frac{\bar{P}_y}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_{x_i}}{\bar{P}_{x_i}}$$

Sendo:  $P_y$  – precipitação mensal ou anual da estação  $Y$  a ter a falha na série preenchida (mm);  $P_{x_i}$  –  $i$ -ésima precipitação mensal ou anual das  $X_i$  estações vizinhas em que se verificou a falha (mm);  $\bar{P}_y$  e  $\bar{P}_{x_i}$  – precipitações médias mensais ou anuais, das estações  $Y$  a ter a falha na série preenchida e das  $i$ -ésimas  $X_i$  estações vizinhas, respectivamente (mm);  $n$  – número de estações vizinhas.

**Exemplo 2.8** – Sabendo-se que a estação  $Y$  a ter a falha preenchida tem  $\bar{P}_y = 180$  mm para o mês de janeiro, determine a precipitação mensal da estação ( $Y$ ) para janeiro/2017. Próximo a estação  $Y$  existem outras três estações  $X_i$  que apresentam os seguintes valores para o mês de janeiro/2017: estação 1 com  $\bar{P}_{x_1} = 162$  mm e  $P_{x_1} = 112$  mm; estação 2 com  $\bar{P}_{x_2} = 214$  mm e  $P_{x_2} = 162$  mm; e, estação 3 com  $\bar{P}_{x_3} = 178$  mm e  $P_{x_3} = 125$  mm.

$$P_y = \frac{\bar{P}_y}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_{x_i}}{\bar{P}_{x_i}} = \frac{180}{3} \cdot \left( \frac{112}{162} + \frac{162}{214} + \frac{125}{178} \right) = 129 \text{ mm (valor de precipitação}$$

estimado para estação  $Y$  para janeiro/2017)

## 3.2 Análise de consistência de séries pluviométricas

### a) Método da análise de dupla massa:

- Formação de reta aproximada;
- Formação de duas retas com mudança de declividade;
- Alinhamento dos pontos em retas paralelas;
- Distribuição errática dos pontos.

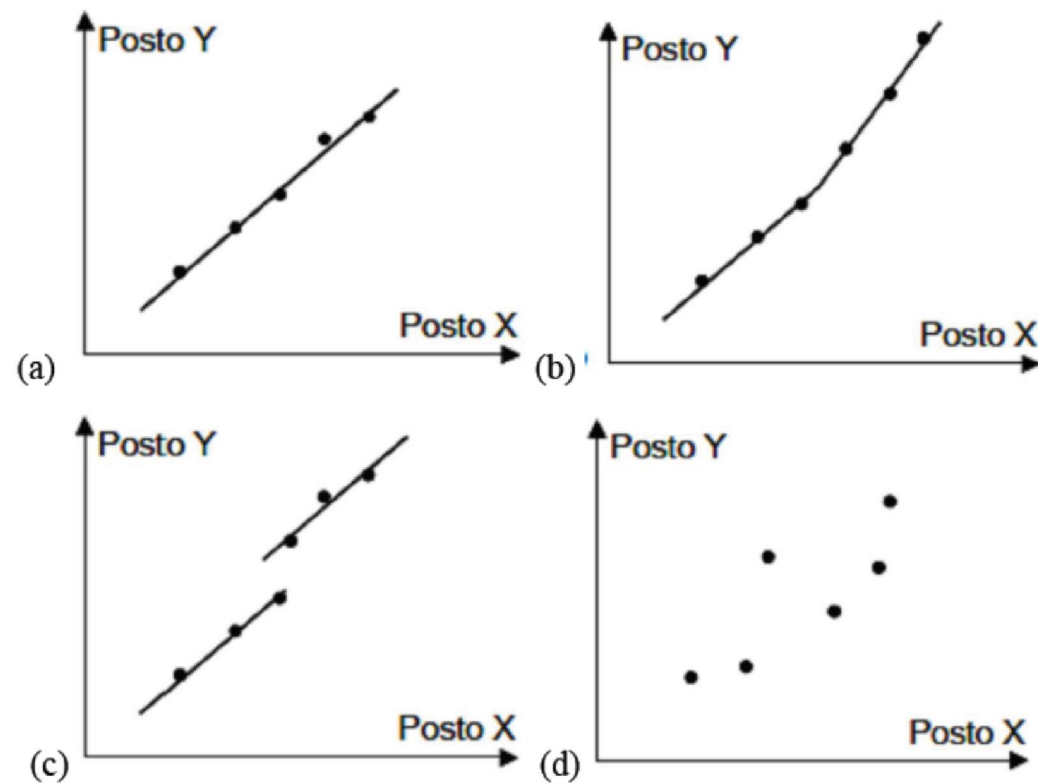


Figura 2.9 – Análise de consistência da estação Y tendo como base a estação X (totais precipitados acumulados), com o método da análise de dupla massa: a) Dados de chuva sem problemas de consistência; b) Dados com mudança de tendência; c) Situação característica de presença de erros de transcrição; e, d) Distribuição errática dos pontos.



# 4 PRECIPITAÇÃO MÉDIA EM UMA BACIA

## a) Método aritmético

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

Sendo:  $\bar{P}$  – precipitação média da bacia (mm);  $P_i$  – precipitações das  $i$ -ésimas estações consideradas (mm);  $n$  – número de estações (decimal).

➤ Recomendação para utilizar o método:

- Bacias menores que 5000 km<sup>2</sup>;
- Distribuição dos aparelhos na bacia for densa e uniforme;
- Área deve ser plana ou possuir relevo muito suave;
- Medidas individuais de cada aparelho variando pouco em relação a média;

**Exemplo 2.9** – Utilizando o Método aritmético, determinar a precipitação média de uma bacia, para o mês de março, a partir de quatro estações (X, Y, Z e W), sabendo que:  $P_x = 175$  mm;  $P_y = 35$  mm,  $P_z = 315$  e  $P_w = 137$  mm.

$$\bar{P} = \frac{175 + 35 + 315 + 137}{4} = 165,5 \text{ mm}$$



Figura 2.10 – Posição das estações

# 4 PRECIPITAÇÃO MÉDIA EM UMA BACIA

## b) Método de Thiessen

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

Sendo:  $\bar{P}$  – precipitação média da bacia (mm);  $P_i$  – precipitações das  $i$ -ésimas estações consideradas (mm);  $A_i$  – áreas de influência das  $i$ -ésimas estações consideradas;  $n$  – número de estações (decimal).

### ➤ Limitações:

- Não considera a influência do relevo (orografia);
- Precisa de boa disposição de estações de medição da precipitação;

**Exemplo 2.10** – Utilizando o Método de Thiessen, determinar a precipitação média de uma bacia, para o mês de março, a partir de quatro estações ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  e  $W$ ), sabendo que:  $P_x = 175$  mm;  $P_y = 35$  mm,  $P_z = 315$  e  $P_w = 137$  mm.

- ### ➤
- Antes de realizar os cálculos é necessário determinar as áreas de influência de cada estação:  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  e  $A_w$ .

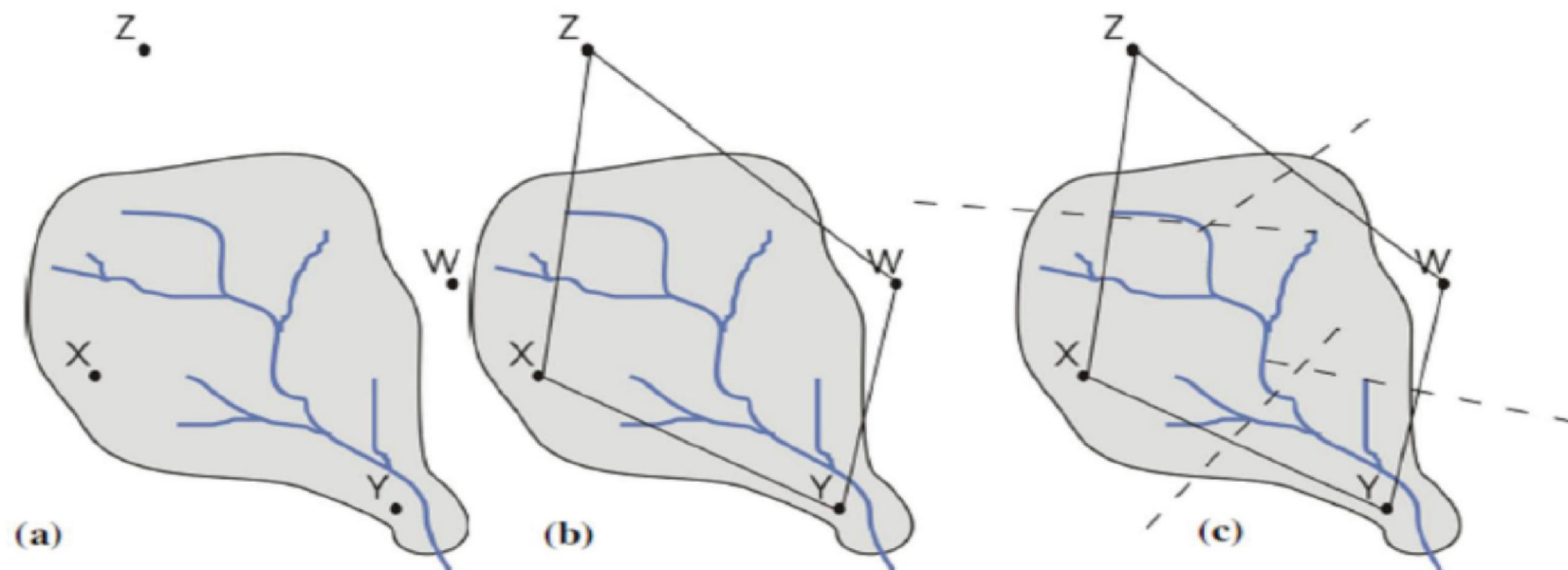


Figura 2.11 – Início do traçado dos polígonos de Thiessen considerando a posição das estações  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  e  $W$ .

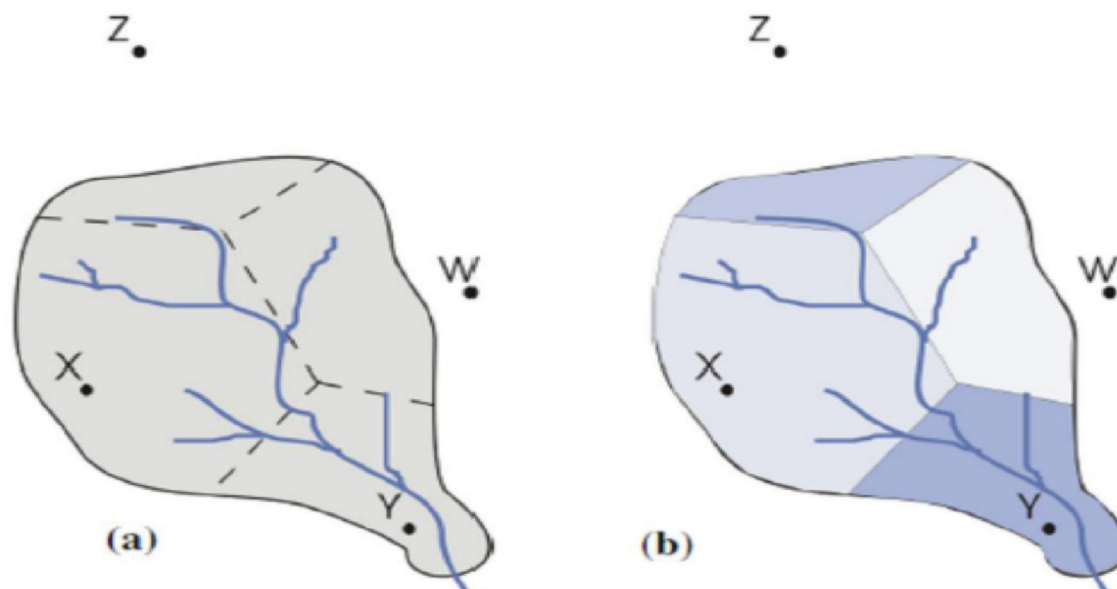


Figura 2.12 – Definição dos polígonos de Thiessen para estimar as áreas de influência das estações  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  e  $W$ .

- Com os polígonos de Thiessen definidos, determina-se as áreas de influência X, Y, Z e W:

$$A_x = 39,4 \text{ km}^2, A_y = 21,5 \text{ km}^2, A_z = 12,3 \text{ km}^2 \text{ e } A_w = 24,6 \text{ km}^2$$

- Calcula-se a precipitação média:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \cdot A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{175 \cdot 39,4 + 35 \cdot 21,5 + 315 \cdot 12,3 + 137 \cdot 24,6}{39,4 + 21,5 + 12,3 + 24,6} = \frac{14892,2}{97,8} = 152,3 \text{ mm}$$

## b) Método das isoietas

- Isoietas

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( A_{(i, i+1)} \cdot \left( \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) \right)}{\sum_{i=1}^n A_{(i, i+1)}}$$

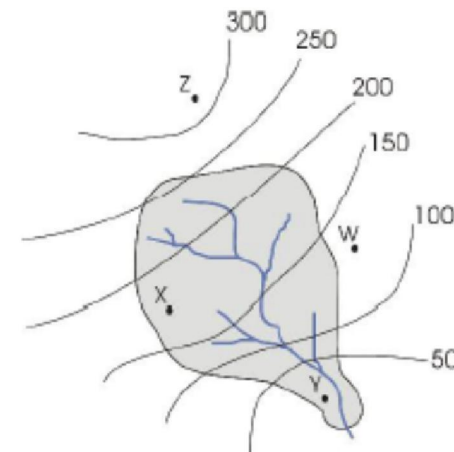


Figura 2.13 – Isoietas mensais contendo os valores em milímetros.

Sendo:  $\bar{P}$  – precipitação média da bacia (mm);  $A_{(i, i+1)}$  – área entre as isoietas  $i$  e “ $i+1$ ” ( $\text{km}^2$ );  $P_i$  e  $P_{i+1}$  – precipitações referentes às isoietas  $i$  e “ $i+1$ ”, respectivamente (mm);  $n$  – número de isoietas consideradas na bacia (decimal).

**Exemplo 2.11** – Utilizando o Método das isoietas, determine a precipitação média de uma bacia, para o mês de março, considerando as informações da [Figura 2.13](#).

Com o mapa das isoietas ([Figura 2.13](#)) os valores de precipitação e áreas entre as isoietas podem ser determinadas:

–  $P_1 = 50 \text{ mm}$ ;  $P_2 = 50 \text{ mm}$ ;  $P_3 = 100 \text{ mm}$ ;  $P_4 = 150 \text{ mm}$ ;  $P_5 = 200 \text{ mm}$ ;  $P_6 = 250 \text{ mm}$ ;  $P_7 = 300 \text{ mm}$ ;

–  $A_{(1,2)} = 10,5 \text{ km}^2$ ;  $A_{(2,3)} = 12,3 \text{ km}^2$ ;  $A_{(3,4)} = 21,5 \text{ km}^2$ ;  $A_{(4,5)} = 32,8 \text{ km}^2$ ;  $A_{(5,6)} = 18,9 \text{ km}^2$ ;  $A_{(6,7)} = 1,8 \text{ km}^2$ ;

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( A_{(i,i+1)} \cdot \left( \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) \right)}{\sum_{i=1}^n A_{(i,i+1)}} = \frac{10,5 \cdot \frac{(50+50)}{2} + 12,3 \cdot \frac{(50+100)}{2} + \dots + 1,8 \cdot \frac{(250+300)}{2}}{10,5 + 12,3 + \dots + 1,8} =$$

$$\frac{525,0 + 922,5 + 2687,5 + 5740,0 + 4252,5 + 495,0}{97,8} = \frac{14622,5}{97,8} = 149,5 \text{ mm}$$

## 5 CHUVAS INTENSAS

- Consideração sobre as chuvas intensas;
- As chuvas intensas são caracterizadas pelos parâmetros:
  - Duração da precipitação (  $t$  );
  - Intensidade (  $i$  );
  - Frequência (  $f_p$  );

$$f_p = \frac{n_i}{N}$$

– A frequência está associada ao Período de Retorno (  $T$  )

$$T = \frac{1}{F(X \geq x_i)}$$

Sendo:  $T$  – período de retorno (anos);  $F(X \geq x_i)$  – frequência com que a variável descritora  $X$ , a precipitação, é maior ou igual ao evento “chuva” com magnitude  $x_i$ (decimal).

## 5 CHUVAS INTENSAS

- Curvas de intensidade-duração-frequência (Figura 2.14);
- Equação de chuvas intensas ajustadas com dados pluviométricos

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

Sendo:  $i$  – intensidade máxima da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $T$  – período de retorno (anos);  $t$  – duração da chuva (minuto); “ $a$ ”, “ $b$ ”, “ $c$ ” e “ $d$ ” – parâmetros obtidos do ajustamento dos dados (determinados para cada localidade).

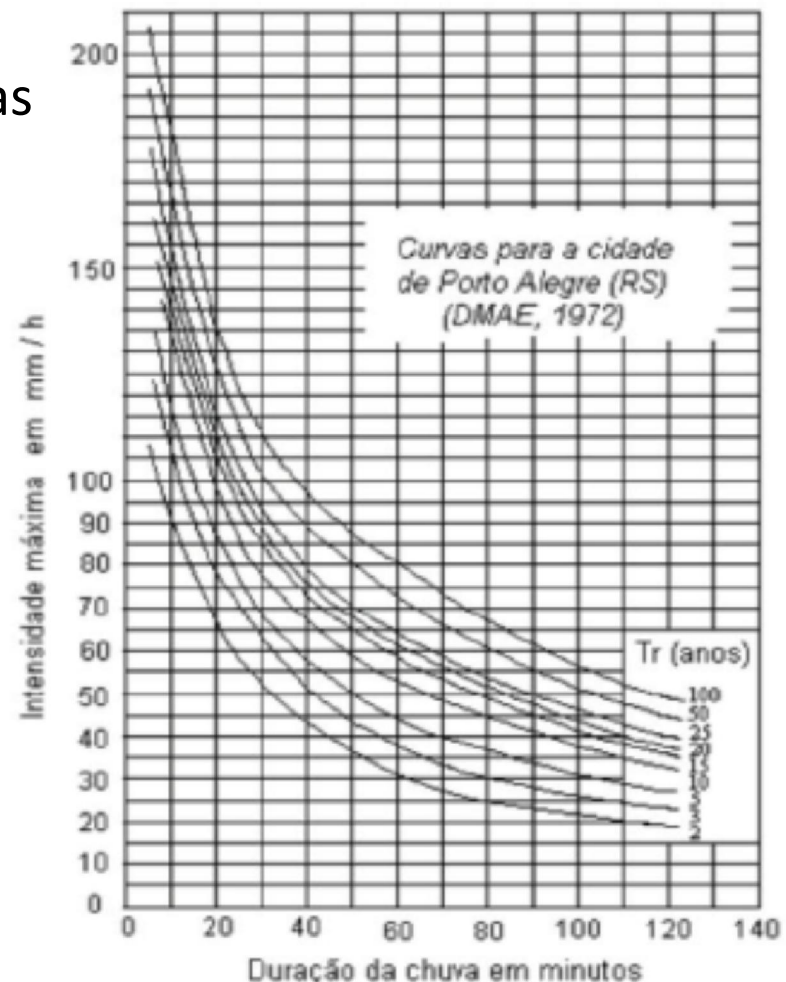


Figura 2.14 – Curvas de intensidade-duração-frequência para a cidade de Porto Alegre (RS)

**Tabela 2.1.** Coeficientes da equação de chuvas intensas ajustados para algumas localidades brasileiras.

Local	----- Parâmetros de ajuste (adimensional) -----				Unidade de saída da Intensidade ( <i>i</i> )
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
Belo Horizonte	1487,9	0,100	20	0,840	mm h <sup>-1</sup>
Curitiba-PR	1239,0	0,150	20	0,740	mm h <sup>-1</sup>
Fortaleza-CE	506,99	0,180	8	0,610	mm h <sup>-1</sup>
Pinheiral-RJ	2313,30	0,210	16	0,930	mm h <sup>-1</sup>
Piracicaba-SP	2017,05	0,160	21	0,91	mm h <sup>-1</sup>
Ponta Grossa-PR	1421,85	0,190	17	0,860	mm h <sup>-1</sup>
Porto Alegre-RS	1265,0	0,052	12	0,880	mm h <sup>-1</sup>
Rio de Janeiro-RJ	5949,2	0,217	26	1,150	mm h <sup>-1</sup>
São Paulo-SP	3462,7	0,172	22	1,025	mm h <sup>-1</sup>



**Exemplo 2.12** – Estimar a intensidade máxima de precipitação ocorrida em Belo Horizonte-PR e Curitiba-PR, para o período de retorno de 10 anos, considerando a chuva com duração de 5 e 60 min. Obs.: Utilize os coeficientes de ajuste da equação de chuvas intensas que se encontram na [Tabela 2.1](#).

– Belo Horizonte: 
$$i = \frac{a \cdot T^b}{(t + c)^d} = \frac{1487,9 \cdot 10^{0,10}}{(5 + 20)^{0,84}} = 125,4 \text{ mm h}^{-1}$$

$$i = \frac{a \cdot T^b}{(t + c)^d} = \frac{1487,9 \cdot 10^{0,10}}{(60 + 20)^{0,84}} = 47,2 \text{ mm h}^{-1}$$

– Curitiba: 
$$i = \frac{a \cdot T^b}{(t + c)^d} = \frac{1239 \cdot 10^{0,15}}{(5 + 20)^{0,74}} = 161,7 \text{ mm h}^{-1}$$

$$i = \frac{a \cdot T^b}{(t + c)^d} = \frac{1239 \cdot 10^{0,15}}{(60 + 20)^{0,74}} = 68,4 \text{ mm h}^{-1}$$

➤ Interpretação dos resultados.

# 6 INTERCEPTAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PELA VEGETAÇÃO

## 6.1 Relações entre interceptação e vegetação

- Interceptação: Parte da água precipitada que fica retida na vegetação (Figura 2.15);
- Capacidade de interceptação:  $f$  (precipitação, cobertura vegetal, condições climática, época do ano, etc)
  - Prados: 5 a 10% da precipitação anual;
  - Bosques espessos: 25% da precipitação anual;
  - Forma geral: 10 a 40% da precipitação anual;
  - $P < 1 \text{ mm}$  é considerada totalmente interceptada.



Figura 2.15 – Interceptação da precipitação

## 6.2 Medição indireta da interceptação

$$I = P - P_p - E + \Delta L$$

Sendo:  $I$  – interceptação ocorrida na vegetação (mm);  $P$  – precipitação pluviométrica total (mm),  $P_p$  – precipitação pluviométrica que penetrou na vegetação (mm);  $E$  – escoamento verificado nos troncos (mm);  $\Delta L$  – variação do armazenamento de água da cobertura morta (mm).

**Exemplo 2.13** – O reflorestamento em bacia hidrográfica aumenta a sua interceptação. Por outro lado, espera-se que o escoamento superficial diminua, devido à redução da lâmina precipitada que chegaria até a superfície do solo.

## 6.3 Capacidade de interceptação máxima da cobertura vegetal

$$S_I = K_I \cdot \text{IAF}$$

Sendo:  $S_I$  – capacidade do reservatório de interceptação (mm); IAF – índice de área foliar da vegetação (adimensional);  $K_I$  – coeficiente de proporcionalidade entre IAF e a interceptação (mm; geralmente considerado 0,2 mm).

**Tabela 2.2.** Índice de área foliar (IAF) para diferentes tipos de vegetação.

Tipo de cobertura	Índice de Área Foliar – IAF) (adimensional)
Coníferas	6,0
Floresta decídua	6,0
Soja irrigada	7,5
Soja não irrigada	6,0
Floresta amazônica	6 a 9,6
Pastagem amazônica (estiagem)	0,5
Pastagem amazônica (época úmida)	3,9
Savana Africana (região semi-árida -Sahel)	1,4
Cerrado (estiagem)	0,4
Cerrado (época úmida)	1,0

**Exemplo 2.14** – Um chuva de 15 mm e 4 horas de duração atinge uma bacia com cobertura vegetal de florestas. Qual é a parcela da chuva que é interceptada? Dados:  $K_I = 0,2$  mm (relação entre interceptação e índice de área foliar) e  $IAF_{\text{floresta}} = 6$  (Tabela 2.2)

– A lâmina interceptada é calculada como:

$$S_I = 0,2 \cdot 6 = 1,2 \text{ mm}$$

Portanto, a capacidade de interceptação corresponde a 1,2 mm do total de 15 mm.

**Exemplo 2.15** – Se durante um ano ocorrem 60 eventos de chuva com mais de 2 mm, qual é o impacto da substituição de florestas ( $IAF_{\text{floresta}} = 6,0$ ) por pastagens ( $IAF_{\text{pastagem}} = 1,0$ ) sobre a superfície da bacia hidrográfica, sabendo que a chuva anual é de 1200 mm?

– Cálculo da lâmina total interceptada com os dois tipos de vegetação, nos 60 eventos de chuva ao longo do ano:

$$S_{I \text{ floresta}} = K_I \cdot IAF_{\text{floresta}} = 0,2 \cdot 6,0 \cdot 60 = 72 \text{ mm}$$

$$S_{I \text{ pastagem}} = K_I \cdot IAF_{\text{pastagem}} = 0,2 \cdot 1,0 \cdot 60 = 12 \text{ mm}$$

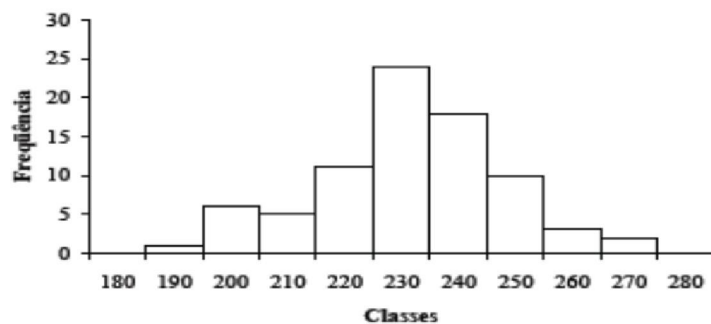
– Com a existência de floresta, chega-se à superfície do solo da bacia hidrográfica 1128 mm de chuva. Com a substituição por pastagem, a superfície recebe 1188 mm. Logo, espera-se a ocorrência de mais infiltração ou escoamento superficial na bacia com a substituição da vegetação.

## 6.4 Interceptação em áreas impermeáveis

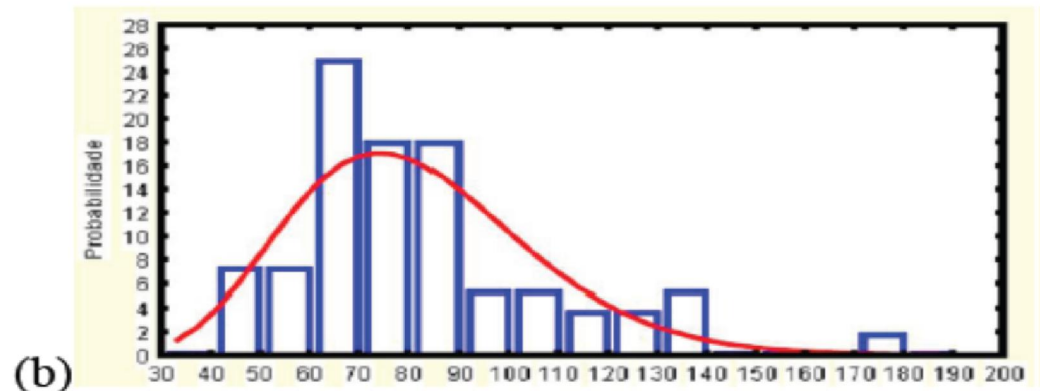
# 7 FREQUÊNCIA E PROBABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO

## 7.1 Conceitos básicos de frequência e probabilidade

- Série histórica de dados ambientais;
- Indicadores que podem ser calculados com uma série de dados (frequência);
- Precipitação => Processo aleatório => Previsão (frequência ou probabilidade);
- A análise de frequência e probabilidade de séries de dados de chuva, pode considerar (Figura 2.16):
  - Precipitação total anual;
  - Precipitação total mensal, quinzenal, decendial, semanal, pentadial;
  - Precipitação máxima diária anual;
  - Precipitação máxima anual ocorrida em determinado tempo de duração.



(a)



(b)

**Figura 2.16** – Distribuição de frequência para: (a) Uma amostra; (b) Uma amostra e uma população (linha cheia). Obs.: A distribuição de uma população é obtida de uma função densidade de probabilidade teórica (*FDP*).

## 7.2 Análise simplificada de frequência das precipitações

- Quando é utilizado: Para série histórica de dados ambientais pequena, contendo falhas ou erros;
- Análise simplificada:
  - Os dados são dispostos em ordem decrescente de valores, sendo atribuído a cada um deles um número ( $m$ ) correspondente a sua ordem:
    - Primeiro valor (maior valor): corresponde a  $m = 1$ ;
    - Segundo valor:  $m = 2$ ;
    - Terceiro valor:  $m = 3$
    - Assim sucessivamente até o valor de  $m = n$  (total de dados ou registros);
    - O valor de  $m$  varia então de 1 até  $n$ .

## 7.2 Análise simplificada de frequência das precipitações

➤ Métodos: Califórnia e Weibull considera que  $F(X \geq x_i) \cong P(X \geq x_i)$

– Método da Califórnia:

$$F(X \geq x_i) = \frac{m}{n}$$

– Método de Weibull (ou Kimball):

$$F(X \geq x_i) = \frac{m}{n + 1}$$

Sendo:  $F(X \geq x_i)$  – frequência com que o valor da precipitação de magnitude  $x_i$ , de ordem  $m$ , foi igualada ou superada considerando as informações da série de dados disponíveis (decimal);  $m$  – número da ordem de uma série de valores decrescentes (decimal);  $n$  – número de registros ou leituras (decimal).

### 7.2.1 Período de retorno (Considerando-se $F(X \geq x_i) \cong P(X \geq x_i)$ )

$$T = \frac{1}{P(X \geq x_i)} \cong \frac{1}{F(X \geq x_i)}$$

Sendo:  $T$  – período de retorno em anos (decimal);  $P(X \geq x_i)$  – probabilidade que a variável descritora  $X$  seja maior que um evento de magnitude  $x_i$  (decimal);

**Exemplo 2.16** – Considerando a pequena série de valores de precipitação máxima diária de uma localidade (18, 59, 20, 83, 41, 51, 12, 28, 95, 72, 75, 46): *i*) Utilizando os Métodos Califórnia e Weibull, determine a probabilidade (frequência) e período de retorno da precipitação máxima diária maior ou igual a 95 mm; *ii*) A probabilidade (frequência) de ocorrer precipitação máxima diária menor que 46 mm.

**Tabela 2.3.** Frequências  $F(X \geq x_i)$  calculada com os Métodos Califórnia e Weibull, e respectivos períodos de retorno ( $T$ ).

Número de ordem	Precipitação máxima	- Frequência $F(X \geq x_i)$ , em (%) -		- Período de retorno $T$ (anos) -	
		Califórnia	Weibull	Califórnia	Weibull
1	95	8,3	7,7	12,0	13,0
2	83	16,7	15,4	6,0	6,5
3	75	25,0	23,1	4,0	4,3
4	72	33,3	30,8	3,0	3,3
5	59	41,7	38,5	2,4	2,6
6	51	50,0	46,2	2,0	2,2
7	46	58,3	53,8	1,7	1,9
8	41	66,7	61,5	1,5	1,6
9	28	75,0	69,2	1,3	1,4
10	20	83,3	76,9	1,2	1,3
11	18	91,7	84,6	1,1	1,2
12	11	100,0	92,3	1,0	1,1

*i*) Califórnia:  $F(x_i) = P(X \geq 95 \text{ mm}) = 8,3\%$  e  $T = 12$  anos

Weibull:  $F(x_i) = P(X \geq 95 \text{ mm}) = 7,7\%$  e  $T = 13$  anos

*ii*) Califórnia:  $P(X < 46) = 1 - P(X \geq 46) = 1 - 0,583 = 0,417 \cdot 100 = 41,7\%$

Weibull:  $P(X < 46) = 1 - P(X \geq 46) = 1 - 0,538 = 0,462 \cdot 100 = 46,2\%$

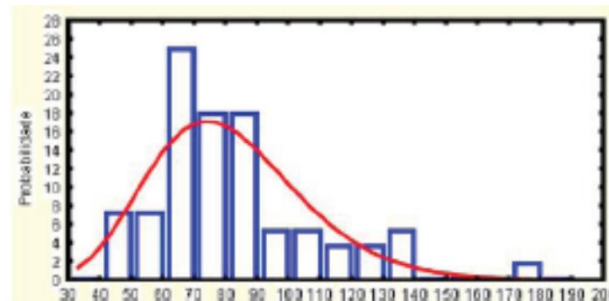


## 7.3 Probabilidade de ocorrência das precipitações

### a) Roteiro para análise de chuvas prováveis com técnicas estatísticas:

- Agrupamento dos dados diários de  $P$  conforme a periodicidade desejada (ano, mês, 15, 10, 7 ou 5 dias);
- Agrupamentos com  $P < 1$  mm são considerados iguais a zero, e separados da série de agrupamentos com valores;
- Realiza-se a distribuição de frequência com os dados agrupados observados, com valores diferentes de zero;
- Escolhe as funções densidade de probabilidade contínuas ( $f_{dp}$ ) a serem testadas;
- Calcula-se os parâmetros estatísticos das  $f_{dp}$ 's testadas;
- Estima-se os valores  $P$  com as  $f_{dp}$ 's a serem analisadas;
- Com a sequência de valores de  $P$  observados (distribuição de frequência) e estimados (com as  $f_{dp}$ 's), realiza-se testes de aderência (com determinado nível de significância), para verificar os ajustes: Qui-quadrado ou Kolmogorov-Smirnov;

#### Exemplo:



## 7.3 Probabilidade de ocorrência das precipitações

### a) Roteiro para análise de chuvas prováveis com técnicas estatísticas:

- Escolhe a *fdp* que melhor se ajustou ao dados observados;
- Calcula o valor da precipitação provável ( $P_{x_i-\%}$ ) com probabilidade de ser igualado ou superado;

**Exemplo 2.17** – Precipitação provável à 75%:  $P_{75\%} = P(P_{75\%} \in P \mid p_i \geq P_{75\%}) = 75\%$ .

- Para as *fdp*'s que não admitem valores nulos, adota-se a distribuição mista:

$$F(X \leq x_i) = P_o + (1 - P_o) \cdot D(x_i)$$

Sendo:  $F(X \leq x_i)$  – função cumulativa de probabilidade da distribuição mista (%);  $P_o$  – probabilidade de ocorrência de decêndios sem precipitação (%) ou com valores menores que 1 mm;  $D(p)$  – probabilidade estimada com a distribuição cumulativa teórica de melhor ajuste, cujos parâmetros foram determinados na ausência de decêndios sem precipitação (%).

- Distribuição teórica de frequência (função densidade de probabilidade – *fdp*) é um modelo matemático para a distribuição real de frequência, que representa todos os valores de uma variável, que pode ser matematicamente manipulada a fim de desenvolver métodos estatísticos:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$

- As *fdp*'s Gama e Normal são muito utilizadas no ajustamento de série de dados de chuva:

### a) *fdp* normal

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Sendo:  $F(x)$  – função de distribuição;  $\mu$  – média;  $\sigma$  – desvio padrão



Figura 2.17 – Distribuição Normal

### b) *fdp* gama

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(\gamma)\beta^\gamma} \cdot \int_0^x x^{\gamma-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}} dx$$

Sendo:  $F(x)$  – função de distribuição;  $\beta$  e  $\gamma$  – parâmetros da distribuição

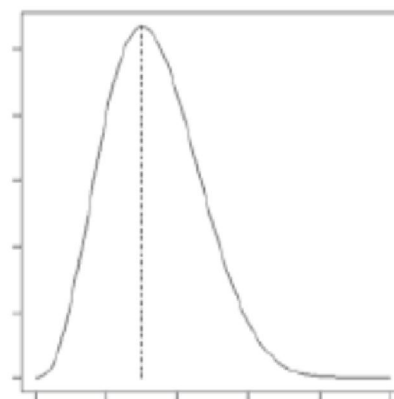


Figura 2.18 – Distribuição Gama

Obs.: As distribuições Normal (Figura 2.17) e Gama (Figura 2.18) não têm solução imediata, exigindo tabelas ou técnicas de integração numérica para obtenção da área abaixo da curva.

## 8 BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Hidrologia aplicada. Tradução de SALDARRIAGA, J. G. São Paulo: McGraw-Hill, 1994. 584p.

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; SOUZA, J.L. M.de; ZOCOLER, J.L. Planejamento da Irrigação: análise de decisão de investimento. Brasília: EMBRAPA, 2005. 627p.

MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. 1ed. Lavras: Ed. UFLA, 2013. 455p.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; DAMAZIO, E. C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 48, n. 7, p. 693-702, 2013.

SOUZA, J. L. M.; SCHÄFER, R. F.; SCHÄFER, H.; JERSZURKI, D. Precipitação medida com pluviômetros alternativos na região de Curitiba, Estado do Paraná. Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais, v. 11, Supl. 2, p. 83-93, 2013.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

FIM