fornece as vazões totais acumuladas (coluna 7). A coluna 8 é obtida colocando-se V em evidência e considerando-se os valores reais de t (coluna 1) em segundos.

Pelo método dos mínimos quadrados, ou seja, pelas equações 6.26 e 6.27, obtêm-se os valores de X = 0,2 e K = 1,46. Uma vez obtidos esses resultados pode-se calcular os coeficientes Co, C1 e C2 pelas equações 6.22, 6.23 e 6.24, qual sejam: Co = 0,125; C1 = 0,475 e C2 = 0,400. Dessa forma, a equação preditiva do amortecimento fica: $Qs_{(i+1)} = 0{,}125Qe_{(i+1)} + 0{,}475Qe_{(i)} + 0{,}400Qs_{(i)}$.

b) Método das tentativas ou Método da Laçada

Nesse método também é necessário se conhecer os hidrogramas de entrada e de saída do trecho a ser analisado, por medição direta e simultânea, para uma ou mais enchentes. Na Figura 6.8 está representado, esquematicamente, o trecho de rio em estudo.

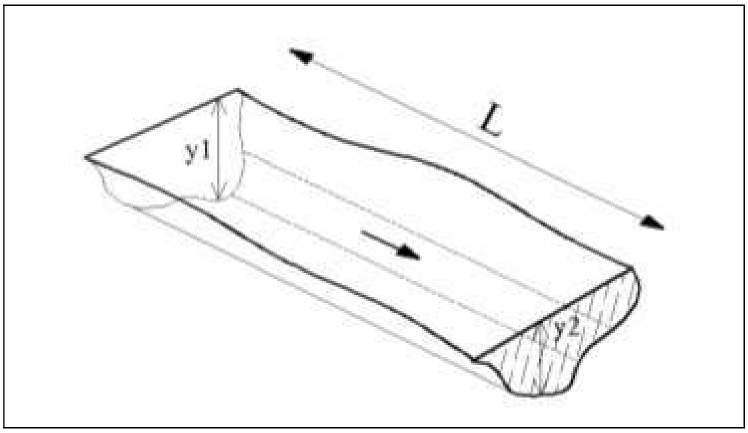


Figura 6.8- Esquema de um trecho do rio responsável pelo amortecimento da onda de cheia, sendo A(y1) a seção de montante (entrada) e A(y2) a seção de jusante (saída).

Inicialmente, calculam-se os volumes armazenados para cada tempo (Vi), achando-se a média das seções de entrada e saída, tal como é expresso na equação 6.28.

$$Vi = \frac{[A(y1i) + A(y2i)]}{2} L \qquad \textbf{equação 6.28}$$

Em que:

Vi – volume armazenado na calha, em cada tempo, m^3;

A(y1i)- seção transversal do rio a montante, em cada tempo, m^2;

A(y2i) – seção transversal do rio a jusante, em cada tempo, m^2; e
L – comprimento do trecho de rio, m.

Observando-se a equação 6.16, verifica-se que se for feito um gráfico com Vi nas abscissas e $\left[X \,.\, Qe_{nédia} + (1 - X) \,.\, Qs_{média}\right]$ nas ordenadas, o coeficiente angular da reta que melhor se adéqua aos pontos representará $tg\,\alpha = \frac{1}{K}$. Tal gráfico configurará uma curva em laço; a reta que representa a tendência do mais estreito dos laços será a desejada. Assim, tendo-se obtido valores de Qe, Qs e V, para cada tempo, assumem-se vários valores de X e verifica-se para qual valor de X o laço de pontos mais se assemelha a uma reta (Figura 6.9); esse valor de X deve ser o escolhido. Escolhida a reta, o seu coeficiente angular permitirá a estimativa de K. Obtendo-se K e X, e conhecendo-se o Δt, calculam-se os valores de Co, C1 e C2 pelas equações 6.22, 6.23 e 6.24, o que permite determinar o hidrograma de saída, tal como visto no item 6.3.1.

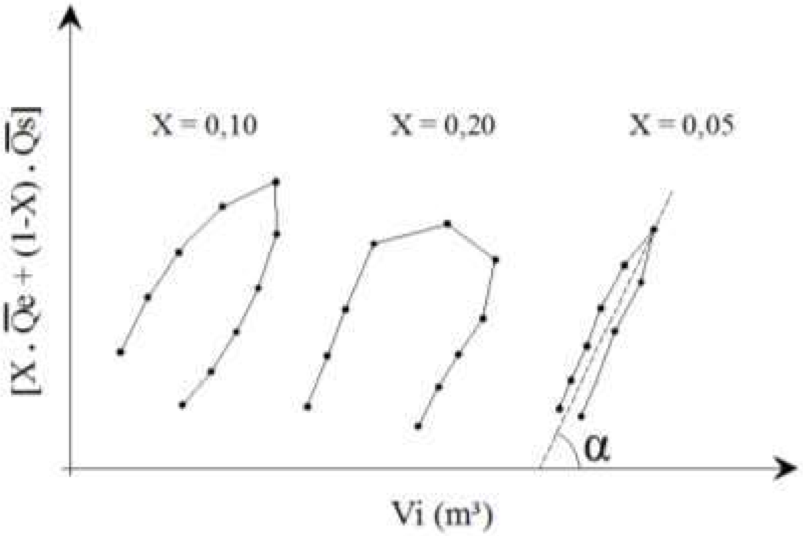


Figura 6.9 – Obtenção do valor de K, fazendo tentativas com o valor de X, escolhendo o laço que proporciona melhor ajuste linear (o terceiro à direita).

6.4- Exercícios propostos

a) Preencha a planilha a seguir e obtenha o hidrograma de saída do reservatório.
Dados:

1) Equação do vertedor:

QS = C . L . h$^{3/2}$; em que C = 2,0 ; L = 6,05 m

2) Curva Cota –volume

V = 1.138,1 . h + 1271,7 ; em que V ($10^3 m^3$) e h (m); com origem na base da soleira do vertedor.

3) Vazões médias do hidrograma de entrada

*Já digitadas na planilha

OBS: considere que a vazão de base do ribeirão é de 8 m^3/s, ou seja, para t=0, QE=QS=8 m^3/s. A primeira linha já está preenchida para facilitar o entendimento.

t(h)	hi(m)	y1(hi)	QEmédia(m3/s)	y2(hi+1)	h(i+1)(m)	QSi(m3/s)	QSi+1(m3/s)	QSmédia(m3/s)
0-1	0,760	589,5	**18,00**	607,5	0,791	**8,00**	8,51	8,26
1-2			**42,00**					
2-3			**84,00**					
3-4			**146,00**					
4-5			**158,00**					
5-6			**115,00**					
6-7			**79,00**					
7-8			**53,00**					
8-9			**36,00**					
9-10			**26,00**					
10-11			**19,00**					
11-12			**14,00**					
12-13			**11,50**					
13-14			**10,50**					

Resposta: Q saída i máxima = Qmax* = 43,8 m^3/s; he = 2,36 m.

b) A partir do hidrograma de vazões afluentes observadas em um curso d'água, da equação cota x volume do reservatório e da equação do vertedor de soleira espessa, determinar o hidrograma de vazões efluentes e a altura máxima da onda de cheia sobre o vertedor.
Dados:

1) Equação do vertedor:

Q = C . L . $h^{3/2}$; em que C = 1,55 e L = 5 m

2) Curva cota x volume

$V = 18.000 + 1.074{,}5 \cdot h^{2{,}84}$; em que $V(m^3)$ e $h(m)$; com origem na base da soleira do vertedor.

3) Hidrograma de entrada

Δt acumulado (minutos)	**Qentra (m^3/s)**
30	10
60	10
90	10
120	16
150	31
180	54
210	88
240	122
270	137
300	131
330	112
360	89
390	68
420	51
450	39
480	30
510	24
540	20
570	17
600	15,5
630	

Resposta:

Δt acumulado (minutos)	h(i) (metros)	h(i+1) (metros)	Qsai (i)(m3/s)
30	1,1850	1,1850	10,00
60	1,1850	1,1850	10,00
90	1,1850	1,1850	10,00
120	1,1850	1,7557	10,00
150	1,7557	2,5836	18,02
180	2,5836	3,5155	32,18
210	3,5155	4,5980	51,08
240	4,5980	5,5689	76,41
270	5,5689	6,1735	101,84
300	6,1735	6,3623	118,87
330	**6,3623**	6,1695	**124,37**
360	6,1695	5,6634	118,76
390	5,6634	4,9323	104,45
420	4,9323	4,0721	84,89
450	4,0721	3,2373	63,68
480	3,2373	2,5452	45,14
510	2,5452	2,1026	31,46
540	2,1026	1,8451	23,62
570	1,8451	1,6499	19,42
600	1,6499	1,5691	16,42
630			

Observando-se a tabela anterior, verifica-se que a maior carga sobre a soleira do vertedor foi de 6,3623 m, o que implica em Qmax = 124,37 m^3/s. Considerando que Qmax = 137 m^3/s, o amortecimento foi de 137 m^3/s – 124,37 m^3/s = 12,63 m^3/s.

Resolver novamente o problema (b) considerando uma largura da soleira do vertedor de 3,5 m.
Resposta:

Δt acumulado (minutos)	h(i) (metros)	h(i+1) (metros)	Qsai (i)(m3/s)
30	1,5042	1,5042	10,00
60	1,5042	1,5042	10,00
90	1,5042	1,5042	10,00
120	1,5042	2,0797	10,00
150	2,0797	3,0023	16,25
180	3,0023	4,0387	28,19
210	4,0387	5,2190	43,99
240	5,2190	6,3131	64,62
270	6,3131	7,0788	85,97
300	7,0788	7,4584	102,07
330	7,4584	7,4784	110,39
360	**7,4784**	7,1960	**110,84**
390	7,1960	6,6769	104,62
420	6,6769	5,9775	93,51
450	5,9775	5,1674	79,20
480	5,1674	4,2925	63,66
510	4,2925	3,4426	48,20
540	3,4426	2,7361	34,62
570	2,7361	2,2518	24,52
600	2,2518	2,0326	15,27
630			

Observando-se a Tabela anterior verifica-se que a maior carga sobre a soleira do vertedor foi de 7,4784 m, o que implica em Qmax = 110,84 m^3/s. Considerando que Qmax = 137 m^3/s, o amortecimento foi de 137 m^3/s – 110,84 m^3/s = 26,16 m^3/s. Comparando-se com o exercício (b), nota-se que diminuindo a largura da soleira, aumenta-se a lâmina d'água no reservatório durante a enchente, o que acarreta em um maior amortecimento da onda de cheia.

c) Sendo dados:

*Equação do vertedor: $Q = 1,8 \cdot L \cdot h^{3/2}$
*Largura do vertedor: L = 150,0 m
*Cota da crista do vertedor: 426,0 m
*Tabela cota x volume

Cota (m)	Volume armazenado ($m^3 \times 10^6$)
426,00	395,0
426,50	400,5
427,00	406,0
427,50	411,0
428,00	416,0
428,50	423,0
429,00	430,0
429,50	434,5
429,97	439,0

Pede-se:

Construir uma tabela que expresse altura d'água sobre a crista X volume armazenado, achar a hidrógrafa de saída preenchendo a tabela a seguir e determinar a vazão máxima amortecida pelo reservatório.

Tempo (horas)	Qentrada (m^3/s)	Qsaída (m3/s)
0	0,00	
4	60,00	
8	170,00	
12	320,00	
16	495,00	
20	660,00	
24	800,00	
28	835,00	
32	790,00	
36	650,00	
40	465,00	
44	300,00	
48	170,00	
52	75,00	
55,6	32,40	

Resposta: para t = 32 horas, Qsaída = Qmax* = 760 m^3/s

d) Sendo dados:

*K = 1,43 horas
*X = 0,19
*Δt = 2 horas

Calcular os parâmetros Co, C1 e C2, completar a tabela a seguir e determinar Qmax* para o trecho de rio.

Tempo (horas)	Qentrada (m^3/s)	Qsaída (m^3/s)
1	3,0	
3	10,2	
5	30,0	
7	14,5	
9	6,8	
11	4,3	

Resposta: Co = 0,337; C1 = 0,589; C2 = 0,0074; para t = 7 horas → Qsaída = Qmax* = 23,0 m^3/s.

7 – ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS

7.1- Introdução

Como foi apresentado nos Capítulos 2, 3 e 4, a grandeza das chuvas ou das vazões utilizadas nos projetos de manejo dos recursos hídricos depende do período de retorno (T) exigido pelo projeto (obra). Uma vez que se disponha de uma série de dados, a análise dos extremos consistirá em associar a magnitude do evento a um período de retorno, facilitando a escolha da grandeza do evento que será utilizado no dimensionamento da obra (DALRYMPLE, 1960).

Os eventos podem ser classificados em máximos e em mínimos. Como exemplos de eventos máximos têm-se as vazões, as precipitações, as cotas de enchente, os volumes intra-anuais de reservatórios, as durações de veranicos, etc. Precipitações e vazões exemplificam os eventos mínimos (ASSIS et al., 1996).

No Capítulo 2 foi realizada uma análise preliminar de extremos envolvendo chuvas máximas anuais de 24 horas de duração. Dispunha-se de 10 valores que foram colocados em ordem decrescente e, em seguida, foi aplicada a expressão $T = \frac{n+1}{m}$, que associava a magnitude da chuva (X) ao período de retorno(T), como é recordado na Figura 7.1.

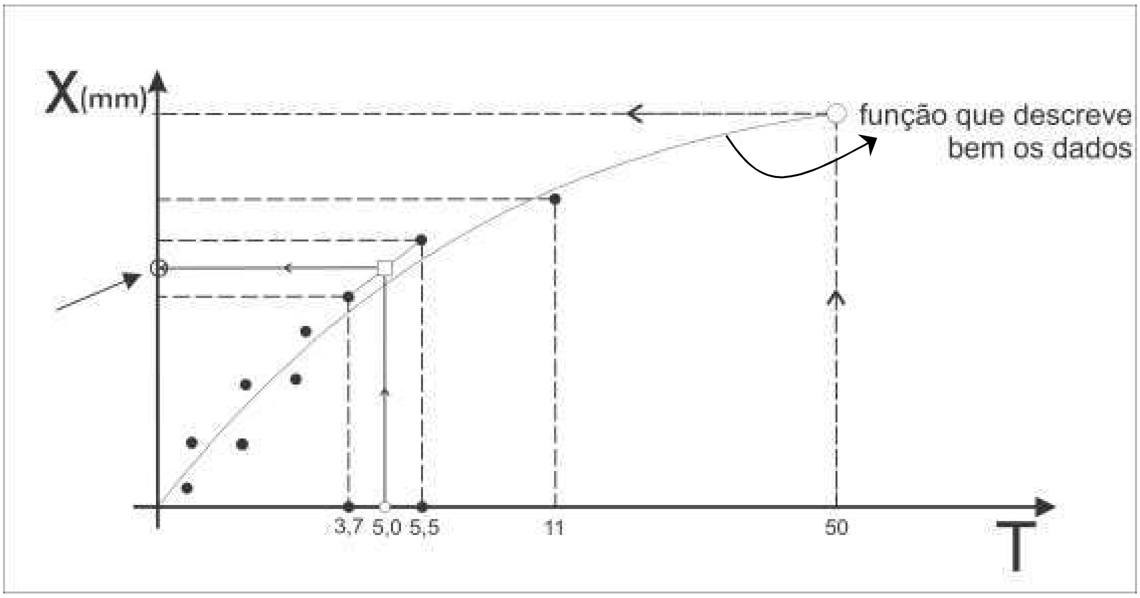


Figura 7.1- Interpolação linear da chuva de período de retorno T = 5 anos, e extrapolação da chuva de T = 50 anos, por meio do uso de uma função estatística.

Para a obtenção da chuva de T = 5 anos, realizou-se uma interpolação linear entre os valores de T = 3,7 anos e T = 5,5 anos. Considerando-se que a correlação entre X e T não é linear, essa solução poderia ser melhorada, caso se conhecesse a função de correlação.

Para a obtenção da chuva de T= 50 anos há necessidade de se fazer uma extrapolação, pois o último dado está relacionado a T = 11 anos. Essa extrapolação exige, também, uma função estatística que correlacione X com T.

O que será visto neste capítulo será, justamente, a obtenção dessas funções, para o caso de eventos máximos e de eventos mínimos. Para isso, entretanto, é necessário discutir-se previamente alguns conceitos iniciais.

7.2 - Conceitos iniciais

7.2.1 - Série de dados

Existem, basicamente, três tipos de séries de dados passíveis de ser trabalhados: séries total, parcial e anual.

a) Série total: é aquela que utiliza todos os dados medidos. É usada por alguns autores para se definir critério de drenagem subterrânea para fins agrícolas, por exemplo. Tem a desvantagem de exigir que se opere com um número grande de dados e de não garantir que um dado seja independente do outro, o que é uma exigência da análise estatística.

b) Série parcial: é obtida selecionando-se todos os valores a partir de um determinado limite. É usada quando o número de anos da série não é suficientemente grande para a análise; nesse caso, a série parcial aumenta a massa de dados a ser analisada. Tem o inconveniente de, ainda, não garantir a independência dos dados.

c) Série anual: é obtida selecionando-se o valor mais extremo de cada ano. É o tipo de série mais usada, pois garante que todos os eventos sejam independentes. Nesse texto, dar-se-á preferência a esse tipo de série.

7.2.2 - Probabilidade de excedência (P) e período de retorno (T)

Quando se trabalha com eventos máximos (enxurradas, por exemplo), a probabilidade de excedência será a probabilidade de ocorrer maior ou igual, o que será representado por $P(\geq)$. Como já visto no Capítulo 2, o período de retorno (T) será dado por $T = \frac{1}{P(\geq)}$. Assim, quanto *maior* for a magnitude do evento, mais raro ele se torna, ou seja, menor a $P(\geq)$ e, consequentemente, maior T.

Quando se trabalha com eventos mínimos (estiagens, por exemplo), a probabilidade de excedência será a probabilidade de ocorrer menor ou igual, o que será representado por $P(\leq)$. De forma análoga, o período de retorno (T) será dado por $T = \frac{1}{P(\leq)}$. Assim, quanto *menor* for a magnitude do evento, mais raro ele se torna, ou seja, quanto menor $P(\leq)$, maior T.

7.2.3 - Risco de falha (J)

É a probabilidade de ocorrer $(\geq \text{para máximos}; \ \leq \text{para mínimos})$ ao longo da vida útil de uma obra (N anos), pelo menos uma vez.

A expressão que fornece o valor de J pode ser obtida da seguinte forma:

P → é a probabilidade de ocorrer em um determinado ano;

(1 – P) → é a probabilidade de não ocorrer em um determinado ano;

$(1 - P)^N$ → é a probabilidade de não ocorrer em N anos;

$1 - (1 - P)^N$ → é a probabilidade de ocorrer, pelo menos 1 vez, em N anos = J

Assim:

$$J = 1 - (1 - P)^N \quad \text{ou} \quad J = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \qquad \textbf{equação 7.1}$$

***Exemplo*:** para uma obra calculada com T = 10 anos, qual o risco de falha (J) para uma vida útil de 1, 5, 10 e 100 anos?

Solução:

Para N = 1 ano → $J = 1 - \left(1 - \frac{1}{10}\right)^{1} = 0{,}10 = 10\%$

Para N = 5 anos → $J = 1 - \left(1 - \frac{1}{10}\right)^{5} = 0{,}40951 = 40{,}951\%$

Para N = 10 anos → J = 65,13 %

Para N = 100 anos → J = 99,997 %

Exemplo: para uma barragem com uma vida útil estimada em 50 anos, qual deve ser o período de retorno usado para o dimensionamento de seu vertedor, caso se deseje um risco de falha de apenas 1 por cento?

Solução:

Colocando-se T em evidência a partir da equação 7.1, obtém-se a equação 7.2:

$$T = \frac{1}{\left[1 - (1 - J)^{1/N}\right]}$$ **equação 7.2**

Assim, aplicando-se a equação 7.2 → $T = \frac{1}{\left[1 - (1 - 0{,}01)^{1/50}\right]} = 4.975{,}5 \text{ anos}$

7.2.4- Probabilidade obtida por fórmulas empíricas e por modelos de distribuição de frequência.

Quando se utiliza uma fórmula empírica para a obtenção da probabilidade de excedência, tem-se como resultado uma relação apenas pontual entre X versus (PouT). Como exemplo dessas expressões pode-se citar:

$$P = \frac{m}{n} \quad (\text{Califórnia})$$

$$P = \frac{m - \frac{1}{2}}{n} \quad (\text{Hazen})$$

$$P = \frac{m}{n + 1} \quad (\text{Kimball})$$

$$P = \frac{m - 0{,}44}{n + 0{,}12} \quad (\text{Tucci})$$

Nessas fórmulas "*m*" representa o número da ordem *decrescente* dos dados para máximos, e o número da ordem *crescente* dos dados para mínimos; "*n*" representa o número de dados.

Já os modelos de distribuição de frequência descrevem toda a curva que relaciona X versus (P ou T), ou seja, são equações que mostram como X varia em função de (P ou T) (HOSKING e WALLIS, 1997; NAGHETTINI e PINTO, 2007). Conforme o fenômeno hidrológico existe um modelo que é mais adequado para a sua descrição, conforme se exemplifica na Tabela 7.1.

Tabela 7.1- Fenômenos hidrológicos e suas funções de densidade de probabilidade.

FENÔMENOS	**DISTRIBUIÇÕES**
1- Precipitação total anual	- Normal
2- Precipitação mensal	-Log-normal -Gama
3- Períodos estiagem	- Harmônica
4- Evapotranspiração	-Beta
5- Eventos extremos máximos	-Gumbel
6- Eventos extremos mínimos	- Weibull

7.3 – Modelo de distribuição de Gumbel

7.3.1 - As equações

Conhecido na Matemática como distribuição de Fisher e Tippet tipo I, foi aplicado pela primeira vez na Hidrologia pelo hidrólogo Gumbel. Trata-se de uma distribuição bastante usada na Europa para descrever eventos máximos, podendo, também, ser aplicada para mínimos, mas com desempenho pior do que para máximos. As equações de 7.3 a 7.4 representam esta distribuição:

Gumbel para máximos → $X = Mo + \frac{1}{\alpha}\left[- Ln(-Ln(1 - 1/T))\right]$ **equação 7.3**

Gumbel para mínimos → $X = Mo + \frac{1}{\alpha}\left[+ Ln(-Ln(1 - 1/T))\right]$ **equação 7.4**

Em que:

X - magnitude do evento hidrológico;

Mo - moda da distribuição;

α - parâmetro que faz as vezes do desvio padrão; e

T - período de retorno, anos.

As equações 7.3 e 7.4 também podem ser apresentadas nas formas das equações 7.5 e 7.6, simplesmente colocando-se o período de retorno (T) em evidência:

Gumbel para máximos → $T = \frac{1}{\left(1 - e^{-e^{(Mo-X).\alpha}}\right)}$ **equação 7.5**

Gumbel para mínimos → $T = \frac{1}{\left(1 - e^{-e^{(X-Mo).\alpha}}\right)}$ **equação 7.6**

Para eventos máximos, α e Mo podem ser calculados pelas equações 7.7 e 7.8:

$\alpha = \frac{\sigma\,\mathrm{n}}{\sigma\,\mathrm{x}}$ **equação 7.7**

$Mo = Xmédio - \frac{Yn}{\sigma n}.\sigma x$ **equação 7.8**

Para eventos mínimos, α e Mo podem ser calculados pelas equações 7.9 e 7.10:

$\alpha = \frac{\sigma\,\mathrm{n}}{\sigma\,\mathrm{x}}$ **equação 7.9**

$Mo = Xmédio + \frac{Yn}{\sigma n}.\sigma x$ **equação 7.10**

σx é o desvio padrão da série = $\sqrt{\dfrac{\sum (x - Xmédio)^2}{n-1}}$; Xmédio representa a média da série de dados. Os valores de Yn (média reduzida) e σ n (desvio padrão reduzido) podem ser obtidos nas Tabelas 7.2 e 7.3, respectivamente.

Tabela 7.2- Média reduzida (Yn) em função do número de dados (n).

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.4952	0.4996	0.5035	0.5070	0.5100	0.5128	0.5157	0.5181	0.5202	0.5220
20	0.5236	0.5252	0.5268	0.5283	0.5296	0.5309	0.5320	0.5332	0.5343	0.5353
30	0.5336	0.5371	0.5380	0.5388	0.5396	0.5402	0.5410	0.5418	0.5424	0.5481
40	0.5436	0.5442	0.5448	0.5453	0.5458	0.5463	0.5468	0.5473	0.5477	0.5481
50	0.5485	0.5489	0.5493	0.5497	0.5501	0.5504	0.5508	0.5511	0.5515	0.5518
60	0.5521	0.5524	0.5527	0.5530	0.5533	0.5535	0.5538	0.5540	0.5543	0.5545
70	0.5548	0.5550	0.5552	0.5555	0.5557	0.5559	0.5561	0.5563	0.5565	0.5567
80	0.5569	0.5570	0.5572	0.5574	0.5576	0.5578	0.5580	0.5581	0.5583	0.5585
90	0.5586	0.5587	0.5589	0.5591	0.5592	0.5593	0.5595	0.5596	0.5598	0.5599
100	0.5600									
150	0.5635									
200	0.5672									

Tabela 7.3– Desvio padrão reduzido (σ n) em função do número de dados (n).

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.9496	0.9676	0.9833	0.9971	1.0095	1.0206	1.0316	1.0411	1.0493	1.0565
20	1.0628	1.0696	1.0754	1.0811	1.0811	1.0864	1.0915	1.0961	1.1004	1.1086
30	1.1124	1.1159	1.1193	1.1226	1.1255	1.1285	1.1313	1.1339	1.1363	1.1388
40	1.1413	1.1436	1.1458	1.1480	1.1499	1.1519	1.1538	1.1557	1.1574	1.1590
50	1.1607	1.1623	1.1638	1.1658	1.1667	1.1681	1.1696	1.1708	1.1721	1.1734
60	1.1747	1.1759	1.1770	1.1782	1.1793	1.1803	1.1814	1.1824	1.1834	1.1844
70	1.1854	1.1863	1.1873	1.1881	1.1890	1.1898	1.1906	1.1915	1.1923	1.1930
80	1.1938	1.1945	1.1953	1.1959	1.1967	1.1973	1.1980	1.1987	1.1994	1.2001
90	1.2007	1.2013	1.2020	1.2026	1.2032	1.2038	1.2044	1.2049	1.2055	1.2066
100	1.2065									
150	1.230									
200	1.236									

Exemplo: uma série de dados de vazões máximas anuais registradas em um posto fluviométrico se adapta bem ao modelo de Gumbel e apresenta 30 anos de dados, possuindo as seguintes características:

*média = 297,85 m^3/s
*desvio padrão = 89,65 m^3/s

Caso se utilize uma vazão máxima de 1.000 m^3/s como base para o dimensionamento de uma dada estrutura, qual o risco de falha para uma vida útil de 25 anos?

Fórmulas:

$$\alpha = \frac{\sigma \text{ n}}{\sigma \text{ x}}$$

$$Mo = Xmédio - \frac{Yn}{\sigma \text{ n}} \sigma \text{ x}$$

$$T = \frac{1}{(1 - e^{-e^{(Mo-X)\alpha}})}$$

$$J = 1 - (1 - \frac{1}{T})^N$$

Solução:

σ n = 1,1124; Yn = 0,5362; α = 0,01241; Mo = 254,637; T = 10.404,6 anos;
J = 0,0024 = 0,24%

Exemplo: uma série anual de vazões mínimas médias de 7 dias consecutivos se adapta bem a distribuição de Gumbel e apresenta 30 anos de dados, possuindo as seguintes características:
*média = 60,49 m^3/s
*desvio padrão = 15,43 m^3/s
Calcule a $Q_{7,10}$

Fórmulas:

$$\alpha = \frac{\sigma\,\mathrm{n}}{\sigma\,\mathrm{x}}$$

$$Mo = Xmédio + \frac{Yn}{\sigma\,\mathrm{n}}\sigma\,\mathrm{x}$$

$$X = Mo + \frac{1}{\alpha}(+Ln(-Ln(1-\frac{1}{T})))$$

Solução:

Yn = 0,5362; σn = 1,1124; α = 0,0721; Mo = 69,93; X = Q7,10 = 38,72 m^3/s

7.3.2 - O uso do papel de Gumbel

O grau de ajuste dos dados ao modelo de Gumbel pode ser avaliado, visualmente, por meio do uso de um papel, que possui no eixo das abscissas uma escala correspondente ao modelo, e no eixo das ordenadas uma escala decimal comum (Figura 7.2).

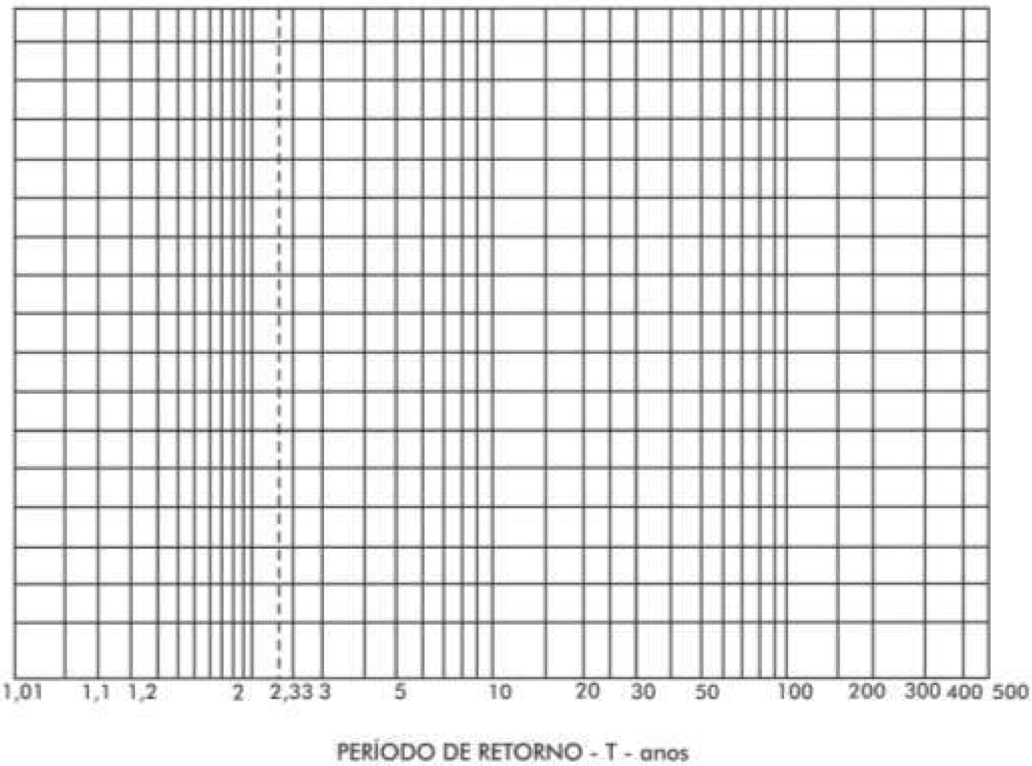


Figura 7.2- Papel de Gumbel usado para se visualizar o ajuste dos dados ao modelo.

Para se utilizar o papel, plotam-se 3 pontos calculados pelo modelo de Gumbel e traça-se uma reta que, obrigatoriamente, passará pelos 3 pontos. Em seguida, plotam-se os pontos calculados por uma fórmula empírica, como Kimball, por exemplo; os desvios destes pontos em relação à reta dará uma idéia da qualidade do ajuste. O exemplo a seguir explica melhor o procedimento.

Exemplo: o Quadro a seguir apresenta as vazões máximas anuais registradas em um posto fluviométrico durante um período de 15 anos, bem como as vazões médias mínimas de 7 dias consecutivos. Os dados estão nas colunas (2) e (3) respectivamente.

Pede-se:

1) Completar o Quadro, colocando as vazões máximas em ordem decrescente, as vazões mínimas em ordem crescente, e calculando os valores do período de retorno (T) pela expressão de Kimball.

2) Plotar os pares de valores (Q x T) relativos às vazões máximas e mínimas nos papéis de Gumbel.

3) Obter as expressões analíticas para máximos e mínimos e traçar retas, com 3 pontos relativos a essas expressões, nos papéis de Gumbel.

4) Por intermédio da expressão analítica para máximos, estimar as vazões máximas para períodos de retorno de 10, 25 e 100 anos.

5) Por intermédio da expressão analítica para mínmos, estimar a Q7,10.

6) Caso se utilize uma vazão máxima de 800 m^3/s como base para o dimensionamento de uma dada estrutura de controle, qual o risco de falha para uma vida útil de 30 anos?

7) Qual a vazão mínima de 7 dias consecutivos esperada nos próximos 20 anos com 20% de risco de falha de não abastecimento?

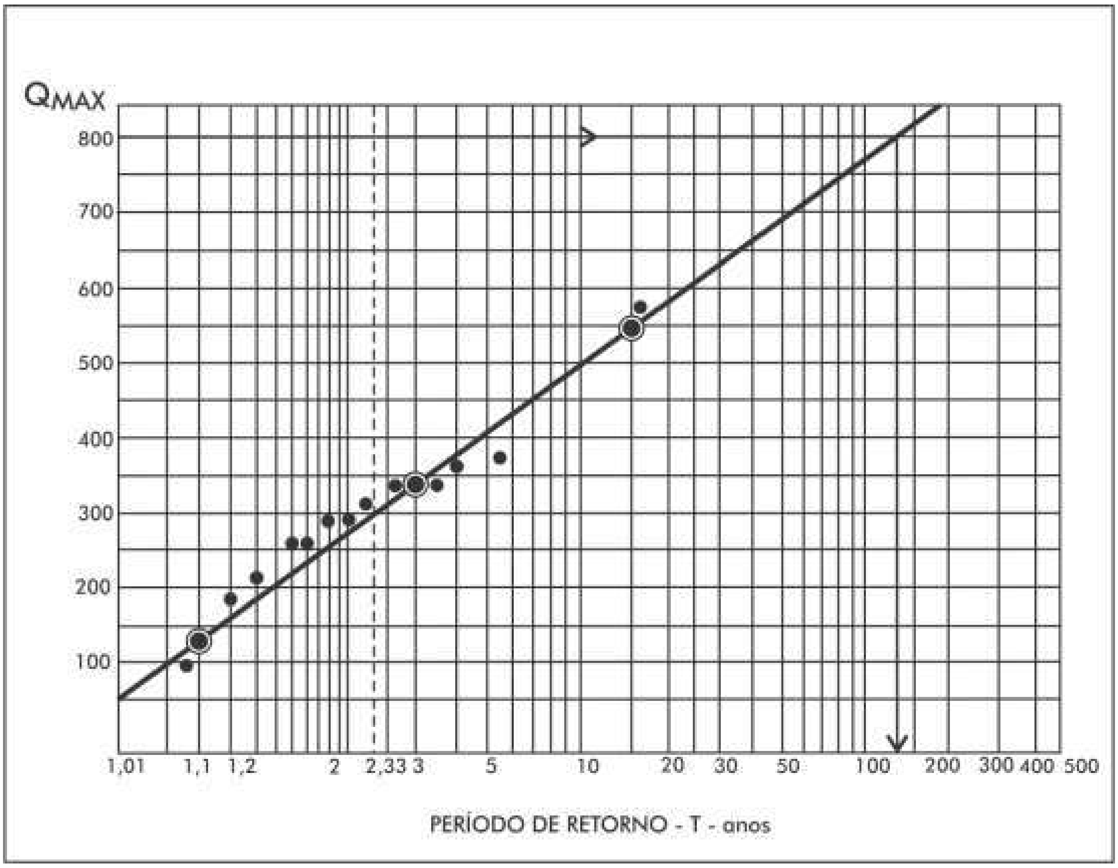
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Ano	**Qmax (m^3/s)**	**Q7min (m^3/s)**	**Qmax [decresc]**	**Qmin [cresc]**	**m**	**T = (n+1)/m**
1950	556,8	66,3				
1951	370,4	68,5				
1952	305,4	70,3				
1953	102,1	49,6				
1954	219,5	45,9				
1955	174,5	45,5				
1956	122,4	64,0				
1957	295,6	81,3				
1958	335,4	95,3				
1959	258,8	67,7				
1960	376,8	61,4				
1961	337,4	45,2				
1962	292,2	60,9				
1963	457,8	44,6				
1964	262,6	40,8				

Solução:

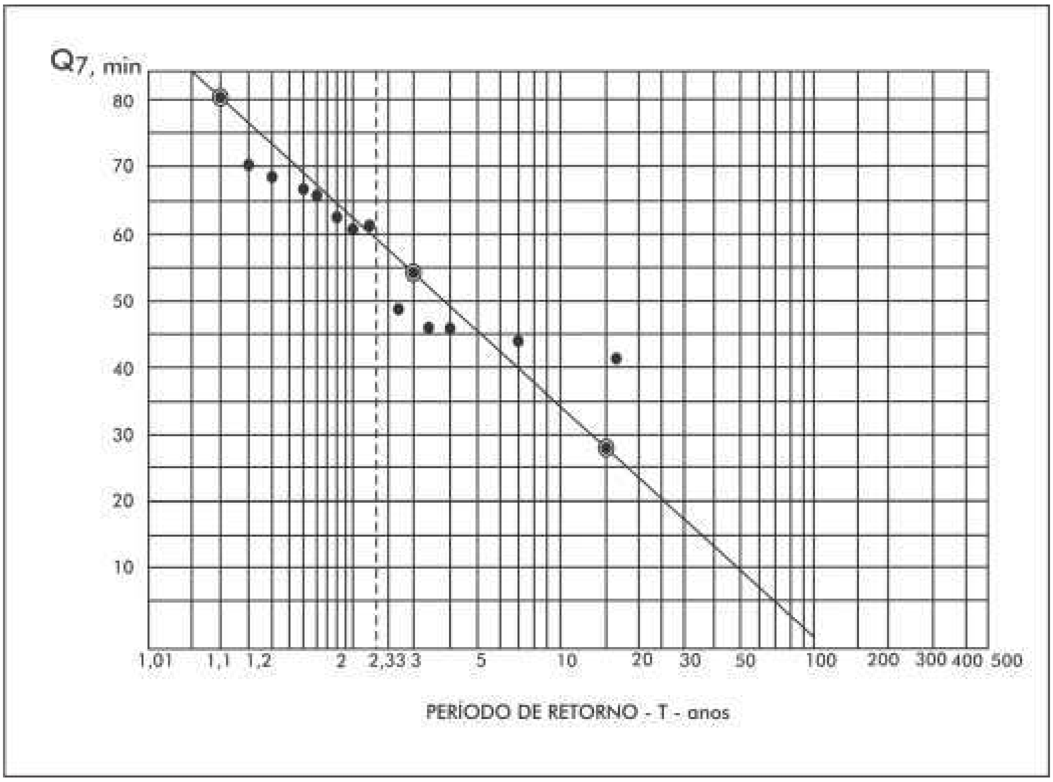
1)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Ano	**Qmax (m^3/s)**	**Q7min (m^3/s)**	**Qmax [decresc]**	**Qmin [cresc]**	**m**	**T = (n+1)/m**
1950	556,8	66,3	556,8	40,8	1	16,0
1951	370,4	68,5	457,8	44,6	2	8,0
1952	305,4	70,3	376,8	45,2	3	5,3
1953	102,1	49,6	370,4	45,5	4	4,0
1954	219,5	45,9	337,4	45,9	5	3,2
1955	174,5	45,5	335,4	49,6	6	2,7
1956	122,4	64,0	305,4	60,9	7	2,3
1957	295,6	81,3	295,6	61,4	8	2,0
1958	335,4	95,3	292,2	64,0	9	1,8
1959	258,8	67,7	262,6	66,3	10	1,6
1960	376,8	61,4	258,8	67,7	11	1,5
1961	337,4	45,2	219,5	68,5	12	1,3
1962	292,2	60,9	174,5	70,3	13	1,2
1963	457,8	44,6	122,4	81,3	14	1,1
1964	262,6	40,8	102,1	95,3	15	1,07

2)



2) (Continuação)



3) (Máximos) → σ n = 1,0206; Yn = 0,5128; Xmédio = 297,85 m^3/s ; σ x = 119,65 m^3/s;

α = 0,00853; Mo = 237,72 m^3/s.

Para T=1,1 anos → X = 135,2 m^3/s;

Para T=3,0 anos → X = 343,6 m^3/s;

Para T=15,0 anos → X = 551,2 m^3/s.

(Mínimos)→ σ n = 1,0206; Yn = 0,5128; Xmédio = 60,49 m^3/s; σ x = 15,43 m^3/s;

α = 0,0661; Mo = 68,243 m^3/s.

Para T=1,1 → X = 81,5 m^3/s;

Para T=3,0 → X = 54,6 m^3/s

Para T=15,0 → X = 27,8 m^3/s.

4)

Para T=10 anos → X = 501,54 m^3/s;

Para T=25 anos → X = 612,69 m^3/s;

Para T=100 anos → X = 777,01 m^3/s.

5)

Para T=10 anos → X = Q7,10 = 34,20 m^3/s

6)

$$T = \frac{1}{(1 - e^{-e^{(Mo-X)\alpha}})} = 121{,}556 \text{ anos}$$

$$J = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{N} = 0{,}2195 = 21{,}95\%$$

7)

$$T = \frac{1}{\left[1 - (1 - J)^{1/N}\right]} = 90{,}13 \text{ anos}$$

Para T=90,13 anos → X = 0,23 m^3/s

7.4 - Distribuição de Log-Pearson Tipo III

É uma das distribuições mais usadas nos Estados Unidos para o ajuste de vazões máximas (GENOVEZ, 1991). Não possui papel especial para verificação visual da qualidade do ajuste como a distribuição de Gumbel. Assim, caso se deseje testar a qualidade do ajuste, deve-se utilizar um teste estatístico de aderência, que será abordado no final deste Capítulo.

Procedimento:

1) Calculam-se os logarítimos das vazões;

2) Calculam-se Média[Log Q] e Desvio Padrão [Log Q] = σ [Log Q];

3) Calcula-se o coeficiente de assimetria "g" pela equação 7.11:

$$g = \frac{N \cdot \sum (\text{Log Q - Média [Log Q]})^3}{(N-1).(N-2)(\sigma[\text{Log Q}])^3}$$ **equação 7.11**

4) Finalmente, aplica-se a equação 7.12, ou seja :

$\text{Log } Q_{(T)} = \text{Média}(\text{Log Q}) + K.\sigma(\text{Log Q})$; em que K é uma função de (g,T)→ Tabela 7.4

Ou

$$Q = 10^{(\text{Média}(\text{Log Q}) + K.\sigma(\text{Log Q}))}$$ **equação 7.12**

Tabela 7.4– Parâmetro K da distribuição de Log-Pearson Tipo III.

Coeficiente de assimetria (g)	Período de retorno (ano): T					
	2	10	25	50	100	200
	Probabilidade (%)					
	50	10	4	2	1	0.5
3.0	-0.396	1.180	2.278	3.152	4.051	4.970
2.5	-0.360	1.250	2.262	3.048	3.845	4.652
2.0	-0.307	1.302	2.219	2.912	3.605	4.298
1.8	-0.282	1.318	2.193	2.848	3.499	4.147
1.6	0.254	1.329	2.163	2.780	3.388	3.990
1.4	-0.225	1.337	2.128	2.076	3.271	3.828
1.2	-0.195	1.340	2.087	2.626	3.149	3.661
1.0	-0.164	1.340	2.043	2.542	3.022	3.489
1.0	-0.164	1.340	2.043	2.542	3.022	3.489
0.9	-0.148	1.339	2.018	2.498	2.957	3.401
0.8	-0.132	1.336	1.993	2.453	2.891	3.312
0.7	-0.116	1.333	1.967	2.407	2.824	3.223
0.6	-0.099	1.328	1.939	2.359	2.755	3.132
0.5	-0.083	1.323	1.910	2.311	2.686	3.041
0.4	0.066	1.317	1.880	2.261	2.615	2.949
0.3	0.050	1.309	1.849	2.211	2.544	2.856
0.2	-0.033	1.301	1.818	2.159	2.472	2.763
0.1	-0.017	1.292	1.785	2.107	2.400	2.670
0	0	1.282	1.751	2.054	2.326	2.576
-0.1	0.019	1.270	1.716	2.000	2.252	2.482
-0.2	0.033	1.285	1.680	1.945	2.178	2.388
-0.3	0.050	1.245	1.643	1.890	2.104	2.294
-0.4	0.066	1.231	1.606	1.834	2.029	2.201
-0.5	0.083	1.216	1.567	1.777	1.955	2.108
-0.6	0.099	1.200	1.528	1.720	1.880	2.016
-0.7	0.116	1.183	1.488	1.663	1.806	1.926
-0.8	0.132	1.166	1.448	1.06	1.733	1.837
-0.9	0.148	1.147	1.407	1.549	1.660	1.749
-1.0	0.164	1.128	1.366	1.492	1.588	1.664
-1.2	0.195	1.086	1.282	1.379	1.449	1.507
-1.4	0.225	1.041	1.198	1.270	1.318	1.351
-1.6	0.254	0.994	1.116	1.166	1.197	1.216
-1.8	0.282	0.945	1.035	1.069	1.087	1.097
-2.0	0.307	0.895	0.959	0.980	0.990	0.995
-2.5	0.360	0.771	0.793	0.798	0.799	0.800
-3.0	0.396	0.660	0.666	0.666	0.667	0.667

Exemplo:

Sendo dada uma série de 15 anos de vazões máximas anuais de um rio, calcular a vazão para um período de retorno de 100 anos pelo método de Log-Pearson Tipo III.

Dados:

Média (Log Q) = 2,4359

σ (Log Q) = 0,1992

$\sum(\text{Log Q - Média}(\text{Log Q}))^3 = -0{,}08026$

Solução:

$$g = \frac{N.\sum(\text{Log Q - Média [Log Q]})^3}{(N-1).(N-2)(\sigma[\text{Log Q}])^3} = \frac{15.(-0{,}08026)}{14.13.(0{,}1992)^3} = -0{,}837$$

Interpolando-se linearmente na Tabela 7.4 (g = - 0,837; T = 100 anos) → K = 1,706

Usando a equação 7.12:

$$Q = 10^{(\text{Média}(\text{LogQ}) + K.\sigma(\text{LogQ}))} = 10^{(2{,}4359 + 1{,}706 \times 0{,}1992)} = 597\ m^3/s$$

7.5- Distribuição de Gumbel-Chow

É um método simplificado para eventos máximos, indicado para quando se deseja fazer uma estimativa rápida (equação 7.13).

$$X = X\text{médio} + K.\sigma x \qquad \textbf{equação 7.13}$$

O parâmetro K é um fator de frequência, que pode ser obtido na Tabela 7.5, em função do número de dados da série (N) e do período de retorno (T).

Tabela 7.5- Fator de freqüência K = f (N, T).

Período de Recorrência (T, anos)							
N/T	5.00	10.00	15.0	20.0	25.0	50.0	100.0
10	**1.058**	**1.848**	**2.289**	**2.606**	**2.817**	**3.538**	**4.323**
11	**1.028**	**1.809**	**2.242**	**2.553**	**2.789**	**3.516**	**4.238**
12	**1.013**	**1.777**	**2.202**	**2.509**	**2.741**	**3.436**	**4.166**
13	**0.996**	**1.748**	**2.168**	**2.470**	**2.699**	**3.045**	**4.015**
14	**0.981**	**1.728**	**2.138**	**2.437**	**2.663**	**3.260**	**4.032**
15	**0.957**	**1.703**	**2.112**	**2.410**	**2.632**	**3.321**	**4.005**
16	**0.955**	**1.632**	**2.037**	**2.379**	**2.691**	**3.283**	**3.959**
17	**0.913**	**1.661**	**2.066**	**2.355**	**2.575**	**3.250**	**3.921**
18	**0.934**	**1.619**	**2.017**	**2.335**	**2.552**	**3.223**	**3.883**
19	**0.926**	**1.626**	**2.032**	**2.317**	**2.533**	**3.190**	**3.860**
20	**0.919**	**1.623**	**2.018**	**2.302**	**2.517**	**3.179**	**3.836**
21	**0.911**	**1.613**	**2.001**	**2.236**	**2.500**	**3.157**	**3.810**
22	**0.905**	**1.603**	**1.992**	**2.272**	**2.484**	**3.138**	**3.787**
23	**0.833**	**1.533**	**1.980**	**2.259**	**2.470**	**3.121**	**3.765**
24	**0.893**	**1.534**	**1.960**	**2.247**	**2.457**	**3.101**	**3.747**
25	**0.983**	**1.575**	**1.958**	**2.235**	**2.44**	**3.033**	**3.729**
26	**0.833**	**1.563**	**1.910**	**2.224**	**2.422**	**3.074**	**3.711**
27	**0.879**	**1.560**	**1.911**	**2.215**	**2.422**	**3.061**	**3.605**
29	**0.570**	**1.347**	**1.924**	**2.195**	**2.402**	**3.037**	**3.667**
30	**0.866**	**1.541**	**1.917**	**2.168**	**2.293**	**3.026**	**3.653**
31	**0.863**	**1.535**	**1.910**	**2.180**	**2.385**	**3.015**	**3.641**
32	**0.890**	**1.530**	**1.904**	**2.173**	**2.377**	**3.005**	**3.629**
33	**0.856**	**1.525**	**1.897**	**2.163**	**2.269**	**2.906**	**3.618**
34	**0.853**	**1.520**	**1.892**	**2.160**	**2.362**	**2.937**	**3.608**
35	**0.851**	**1.516**	**1.886**	**2.152**	**2.354**	**2.979**	**3.598**
36	**0.812**	**1.511**	**1.831**	**2.147**	**2.349**	**2.971**	**3.508**
37	**0.915**	**1.507**	**1.876**	**2.142**	**2.314**	**2.063**	**3.579**
38	**0.813**	**1.503**	**1.871**	**2.137**	**2.33**	**2.957**	**3.571**
39	**0.810**	**1.499**	**1.867**	**2.131**	**2.331**	**2.950**	**3.563**
40	**0.829**	**1.495**	**1.862**	**2.126**	**2.326**	**2.913**	**3.554**
41	**0.834**	**1.492**	**1.858**	**2.121**	**2.321**	**2.936**	**3.517**
42	**0.834**	**1.450**	**1.854**	**2.117**	**2.316**	**2.930**	**3.539**
43	**0.832**	**1.483**	**1.850**	**2.112**	**2.311**	**2.924**	**3.522**
44	**0.830**	**1.482**	**1.846**	**2.103**	**2.307**	**2.919**	**3.526**
45	**0.828**	**1.478**	**1.812**	**2.104**	**2.303**	**2.913**	**3.519**
46	**0.826**	**1.476**	**1.899**	**2.100**	**2.208**	**2.933**	**3.513**

47	**0.824**	**1.474**	**1.826**	**2.095**	**2.291**	**3.903**	**2.507**
48	**0.821**	**1.471**	**1.832**	**2.093**	**2.200**	**2.893**	**3.501**
49	**0.821**	**1.469**	**1.830**	**2.090**	**2.297**	**2.891**	**3.403**
50	**0.820**	**1.463**	**1.827**	**2.096**	**2.283**	**2.859**	**3.490**
51	**0.818**	**1.464**	**1.824**	**2.063**	**2.280**	**2.885**	**3.486**
52	**0.817**	**1.462**	**1.821**	**2.030**	**2.276**	**2.281**	**3.541**
53	**0.815**	**1.459**	**1.818**	**2.077**	**2.273**	**2.875**	**3.474**
54	**0.814**	**1.457**	**1.816**	**2.074**	**2.270**	**2.873**	**3.741**
55	**0.813**	**1.453**	**1.813**	**2.071**	**2.267**	**2.869**	**3.467**
56	**0.812**	**1.453**	**1.811**	**2.069**	**2.264**	**2.863**	**3.462**
57	**0.819**	**1.451**	**1.898**	**2.063**	**2.261**	**2.802**	**3.459**
58	**0.809**	**1.419**	**1.895**	**2.054**	**2.258**	**2.833**	**3.454**
59	**0.808**	**1.428**	**1.894**	**2.061**	**2.256**	**2.055**	**3.450**
60	**0.194**	**1.446**	**1.892**	**2.059**	**2.263**	**2.852**	**3.456**

Exemplo:

Sendo dada uma série de 15 anos de vazão máxima com Xmédio = 297,85 m^3/s e σ x = 119,65 m^3/s, estime a vazão máxima para um período de retorno T = 100 anos, pelo método de Gumbel-Chow.

Solução:

Utilizando a Tabela 7.5 → K(15, 100) = 4,005

Utilizando a equação 7.13

$$X = Xmédio + K \,.\, \sigma\, x = 297{,}85 + 4{,}005 \, x \, 119{,}65 = 777 \, m^3 / s$$

7.6- Distribuição de Weibull

É a distribuição que, geralmente, fornece o melhor ajuste para vazões mínimas (HAAN, 1994).

7.6.1- O coeficiente de assimetria (γ) da distribuição de Weibull

O valor de γ é dado pelas equações 7.14 e 7.15:

$$\gamma = \frac{n^2 . M3}{(n-1)(n-2).\sigma x^3}$$ **equação 7.14**

Sendo:

$$M3 = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(xi - Xmédio)^3}{n}$$ **equação 7.15**

O coeficiente de assimetria γ pode assumir valores positivos ou negativos, conforme é ilustrado na Figura 7.3.

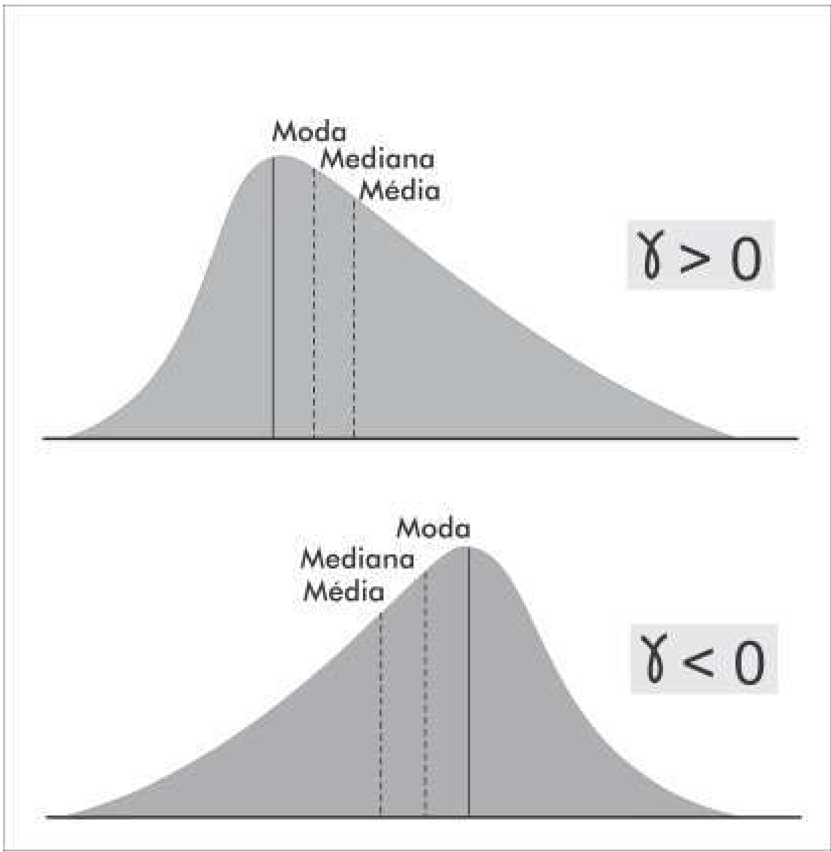


Figura 7.3- Coeficiente de assimetria (γ) da distribuição de Weibull, positivo e negativo.

7.6.2- Parâmetros da distribuição de Weibull

$$\mathrm{Prob}\left(x \leq X\right) = 1 - e^{-Y(x)}$$ **equação 7.16**

$$Y(x) = \left\{ \frac{(x - \varepsilon)}{(\beta - \varepsilon)} \right\}^{\alpha}$$ **equação 7.17**

$$\varepsilon = \beta - \sigma \, x \, . \, B(\alpha)$$ **equação 7.18**

$$\beta = \text{Xmédio} + \sigma \, x \, . \, A(\alpha)$$ **equação 7.19**

Sendo:

$A(\alpha) \Rightarrow \text{Tabelado } f(\gamma)$

$B(\alpha) \Rightarrow \text{Tabelado } f(\gamma)$

$1/\alpha \Rightarrow \text{Tabelado } f(\gamma)$

Tabela 7.6 – Parâmetros da distribuição de Weibull como função do coeficiente de assimetria (γ)

γ	**1/α**	**A(α)**	**B(α)**
-1.000	0.02	0.446	40.005
-0.971	0.03	0.44	26.987
-0.971	0.04	0.442	20.481
-0.867	0.05	0.439	16.576
-0.638	0.10	0.425	8.737
-0.254	0.20	0.389	4.755
0.069	0.30	0.346	3.370
0.359	0.40	0.297	2.364
0.631	0.50	0.246	2.159
0.896	0.60	0.193	1.815
1.160	0.70	0.142	1.549
1.430	0.80	0.092	1.334
1.708	0.90	0.044	1.154
2.000	1.00	0.000	1.000
2.309	1.10	-0.040	0.867
2.640	1.20	-0.077	0.752
2.996	1.30	-0.109	0.652
3.382	1.40	-0.136	0.563
3.802	1.50	-0.160	0.486
4.262	1.60	-0.180	0.418
4.767	1.70	-0.196	0.359
5.323	1.80	-0.280	0.308
5.938	1.90	-0.217	0.263
6.619	2.00	-0.224	0.224
7.374	2.10	-0.227	0.190
8.214	2.20	-0.229	0.161

Exemplo:

As descargas mínimas anuais de um rio possuem média de 125 m^3/s, desvio padrão de 50 m^3/s e coeficiente de assimetria γ = 1,4. Usando a distribuição de Weibull, avalie a probabilidade da vazão mínima anual, ser menor que 100 m^3/s.

Solução:

$$\gamma = 1{,}4 \Rightarrow \text{Interpolan do Tabela } 7.6 \Rightarrow 1/\alpha = 0{,}79$$

$$\gamma = 1{,}4 \Rightarrow \text{Interpolan do Tabela } 7.6 \Rightarrow \mathrm{A}(\alpha) = 0{,}098$$

$$\gamma = 1{,}4 \Rightarrow \text{Interpolan do Tabela } 7.6 \Rightarrow \mathrm{B}(\alpha) = 1{,}36$$

$$\alpha = \frac{1}{0{,}79} = 1{,}266$$

$\beta = \text{Xmédio} + \sigma\,x\,.\,A(\alpha) = 125 + 50\,.\,0{,}098 = 129{,}9$

$\varepsilon = \beta - \sigma\,x\,.\,B(\alpha) = 129{,}9 - 50\,.\,1{,}36 = 61{,}9$

$$Y(x) = \left\{\frac{(x - \varepsilon)}{(\beta - \varepsilon)}\right\}^{\alpha} = \left\{\frac{(100 - 61{,}9)}{(129{,}9 - 61{,}9)}\right\}^{1{,}266} = 0{,}480$$

$$\text{Prob}\,(x \leq 100) = 1 - e^{-Y(x)} = 1 - e^{-0{,}480} = 0{,}381 = 38{,}1\%$$

Exemplo:

Achar o coeficiente de assimetria (γ) para a série de 15 anos de vazões mínimas anuais fornecidas a seguir:

ANO	Qmin (m^3/s)		ANO	Qmin (m^3/s)
1950	66,3		1958	95,3
1951	68,5		1959	67,7
1952	70,3		1960	61,4
1953	49,6		1961	45,2
1954	45,9		1962	60,9
1955	45,5		1963	44,6
1956	64,0		1964	40,8
1957	81,3			

Solução:

Xmédio = 60,49

σ x = 15,43

M3 = 2.020,86

γ = 0,6797

7.7- Distribuição Log-normal

Tal como a distribuição de Gumbel, pode ser usada para máximos ou para mínimos. É bastante usada, também, para o cálculo da precipitação efetiva quinzenal esperada, durante o período de estiagem de uma região, visando o cálculo de irrigação complementar (BERNARDO, 1982).

7.7.1- Log-normal para máximos

Procedimento

1) Calcular os logarítimos de Qi;

2) Calcular Média (Log Qi) e σ (Log Qi);

3) Arbitrar 3 valores de Q e calcular $u = \dfrac{\text{Log Q - Média(Log Qi)}}{\sigma\ \text{(Log Qi)}}$;

4) Por meio da Tabela da Lei Normal, achar $P(x \leq X)$ e, em seguida, achar $P(x \geq X) = 1 - P(x \leq X)$.

5) Plotar os 3 pontos no papel Log-normal e traçar uma reta para verificar, visualmente, a qualidade do ajuste (Figura 7.4).

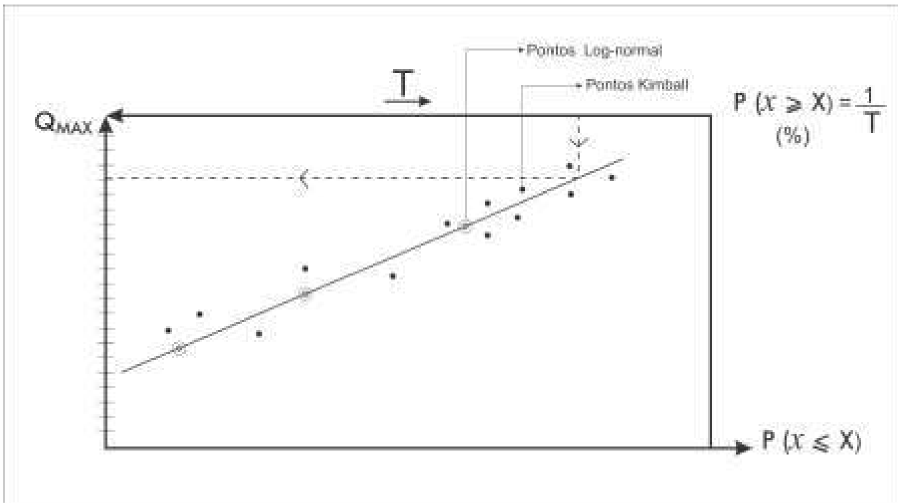


Figura 7.4– Distribuição de pontos no papel Log-normal.

Exemplo:

Sendo dados:

Q = 5.000 L/s;

Média (Log Qi) = 3,183;

σ (Log Qi) = 0,149

Calcular a probabilidade de excedência para a vazão 5.000 L/s.

Solução:

$$u = \frac{\text{Log Q - Média(Log Qi)}}{\sigma\ \text{(Log Qi)}} = \frac{\text{Log}(5.000) - 3,183}{0,149} = \frac{3,699 - 3,183}{0,149} \quad \therefore\ u = 3,46$$

Consultando-se a Tabela 7.7 a seguir, obtém-se $\Phi(3,46) = 0,9997 = 99,97\%$

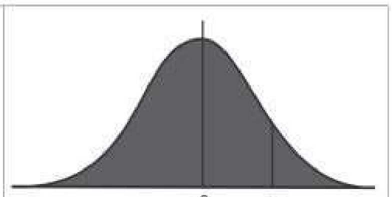
Tabela 7.7- Áreas delimitadas pela curva normal Standard.

TABELA 6.7

ÁREAS DELIMITADAS PELA CURVA NORMAL STANDARD

de $-\infty$ até x

$$\text{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-t^2/2}\, dt$$



X	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5754
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7258	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7518	0,7549
0,7	0,7580	0,7612	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7996	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,0	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990
3,1	0,9990	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998
3,5	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998
3,6	0,9998	0,9998	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
3,7	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
3,8	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
3,9	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Assim, $P(x \le X) = 99{,}997\% \;\therefore\; P(x \ge X) = 1 - 0{,}9997 \;=\; 0{,}03\,\%$

Exemplo:

Sendo dados:

Q = 1.000 L/s

Média (Log Qi) = 3,183

σ (Log Qi) = 0,149

Calcular a probabilidade de excedência associada a vazão de 1.000 L/s

Solução:

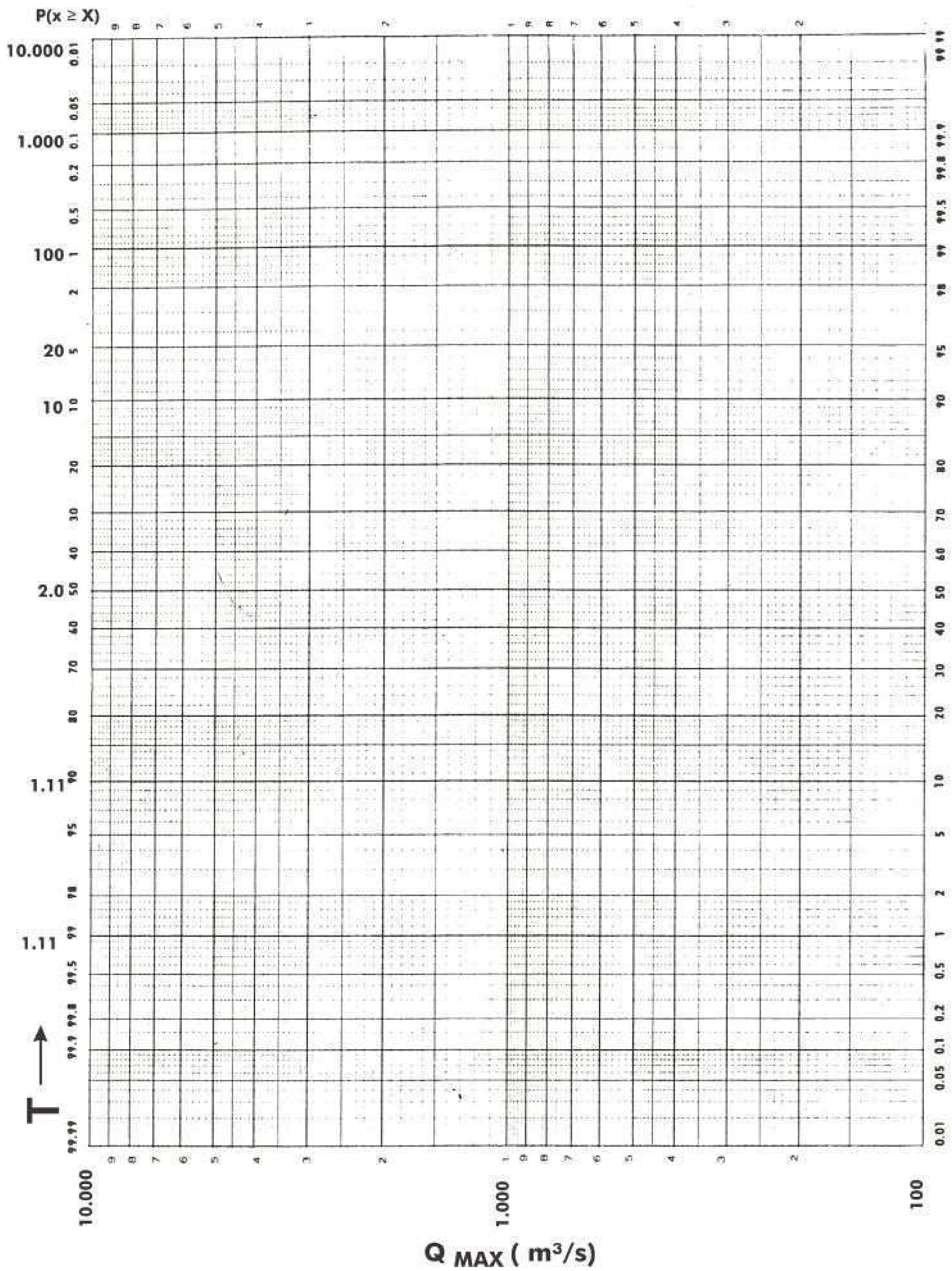
$$u = \frac{\text{Log}\,1000 - 3{,}183}{0{,}149} = \frac{3 - 3{,}183}{0{,}149} = -1{,}23$$

$$\Phi\left(+1{,}23\right) = 0{,}8907 \;\therefore\; P\left(x \geq X\right) = 0{,}8907 \;=\; 89{,}07\%$$

Exemplo:

Complete o quadro a seguir, calculando a probabilidade P(x ≥ X) para as três vazões indicadas. Plote esses pontos no papel Log-normal, trace uma reta e, graficamente, ache as vazões máximas para períodos de retorno de 10, 25 e 100 anos.

Anos	**Qmax(m3/s)**	**Qmax decresc(m3/s)**	**Log(Qmax)**	**u**	**P(x ≥ X) (%)**
1950	556,8				
1951	370,4				
1952	305,4				
1953	102,1				
1954	219,5				
1955	174,5				
1956	122,4				
1957	295,6				
1958	335,4				
1959	258,8				
1960	376,8				
1961	337,4				
1962	292,2				
1963	457,8				
1964	262,6				
		Média →			
		Desvio Padrão →			



Resposta:

Q10 = 475 m^3/s

Q25 = 600 m^3/s

Q100 = 775 m^3/s

7.7.2- Log-Normal para mínimos

Procedimento

1) Calcular os logarítimos de Qi;

2) Calcular Média(Log Qi) e σ (Log Qi);

3) Arbitrar 3 valores de Qi e calcular $u = \dfrac{\text{Log Qi - Média(Log Qi)}}{\sigma\left(\text{Log Qi}\right)}$;

4) Por meio da Tabela da Lei Normal achar $P\left(x \leq X\right)$; e

5) Plotar os 3 pontos no papel Log-normal e traçar uma reta. Plotando-se todos os pontos calculados por Kimball, pode-se fazer uma avaliação visual da dispersão (Figura 7.5).

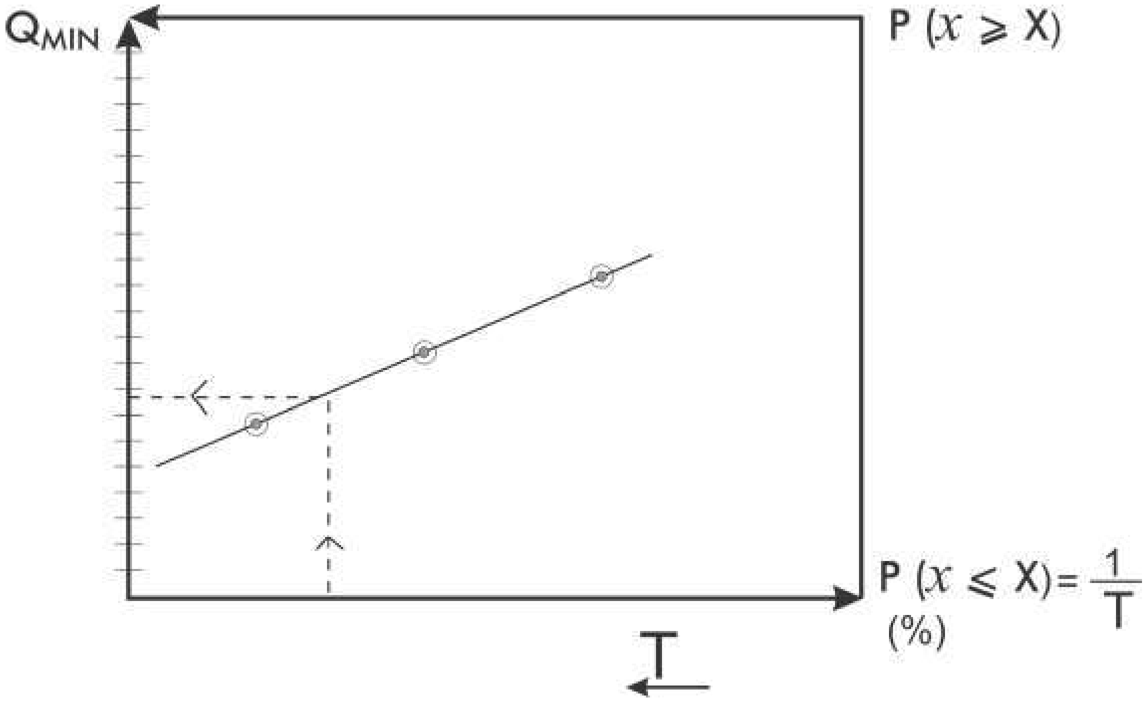
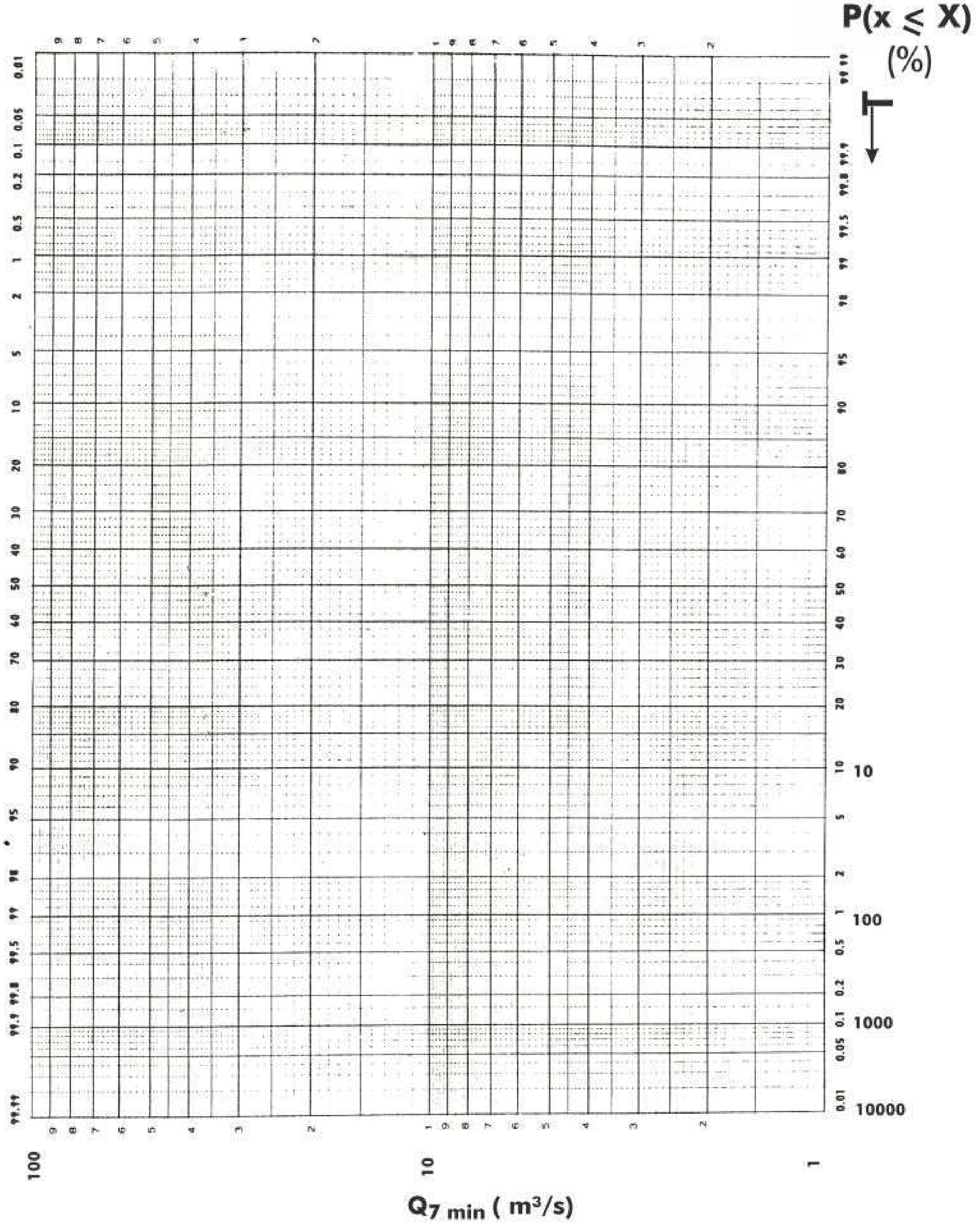


Figura 7.5- Representação de dados de mínimos no papel Log-normal.

Exemplo:

Completar o quadro a seguir, calculando a probabilidade P(x ≤ X) para as três vazões indicadas. Em seguida, plotar esses pontos no papel Log-normal, traçar uma reta e, graficamente, achar a Q 7, 10.

Anos	Q 7 min (m3/s)	Q 7 min cresc(m3/s)	Log(Q 7 min)	u	P(x ≤ X) (%)
1950	66,3				
1951	68,5				
1952	70,3				
1953	49,6				
1954	45,9				
1955	45,5				
1956	64,0				
1957	81,3				
1958	95,3				
1959	67,7				
1960	61,4				
1961	45,2				
1962	60,9				
1963	44,6				
1964	40,8				
		Média →			
		Desvio Padrão →			



Resposta: Q7-10 ≈ 42 m^3/s