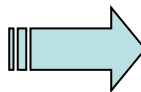


11 – Escoamento superficial

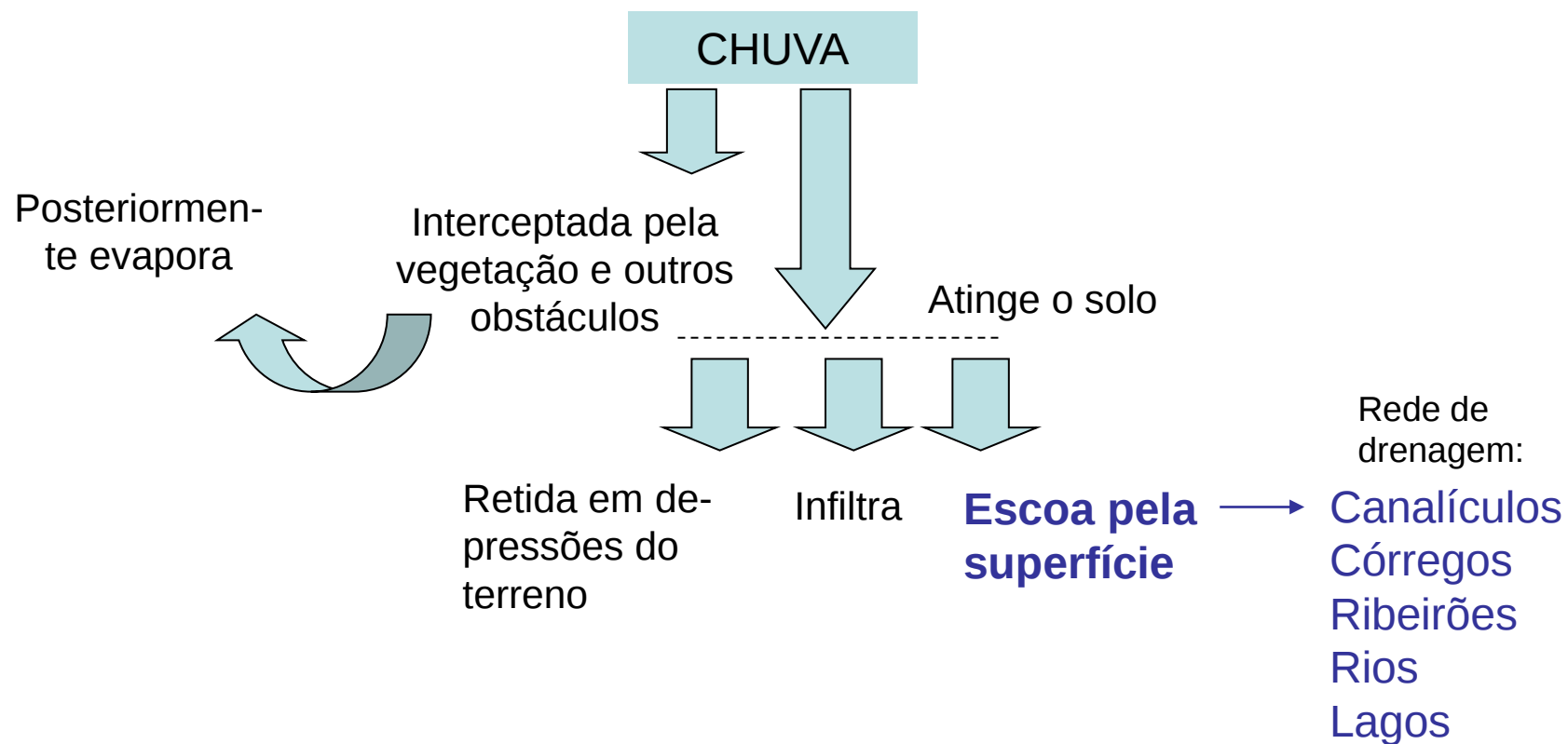
- Entender o processo do escoamento superficial
- Separar o escoamento superficial

Generalidades e ocorrência

ESCOAMENTO SUPERFICIAL



Estuda o deslocamento das águas na superfície da terra



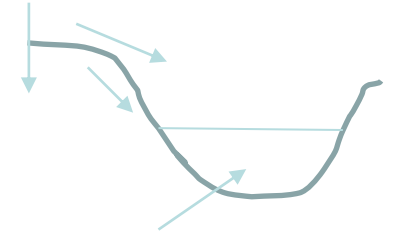
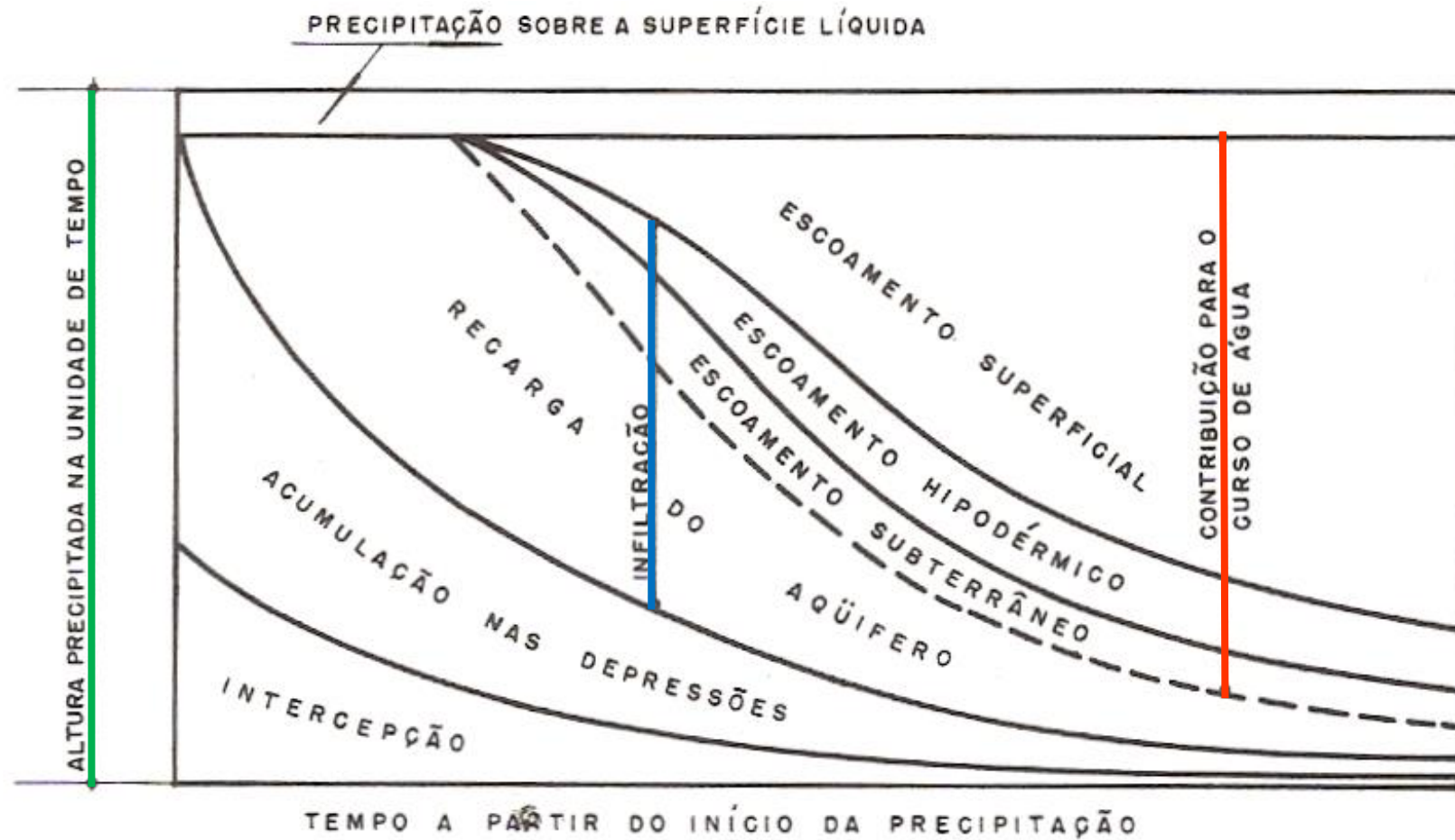
Perdas/abstrações iniciais

Retida em depressões, vegetação e outros

Perdas/abstrações contínuas

Evaporação, infiltração

Componentes do escoamento dos cursos de água



Hidrograma

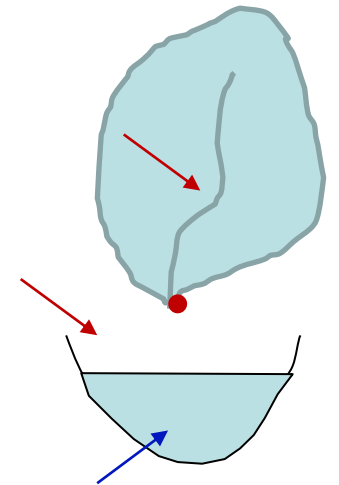
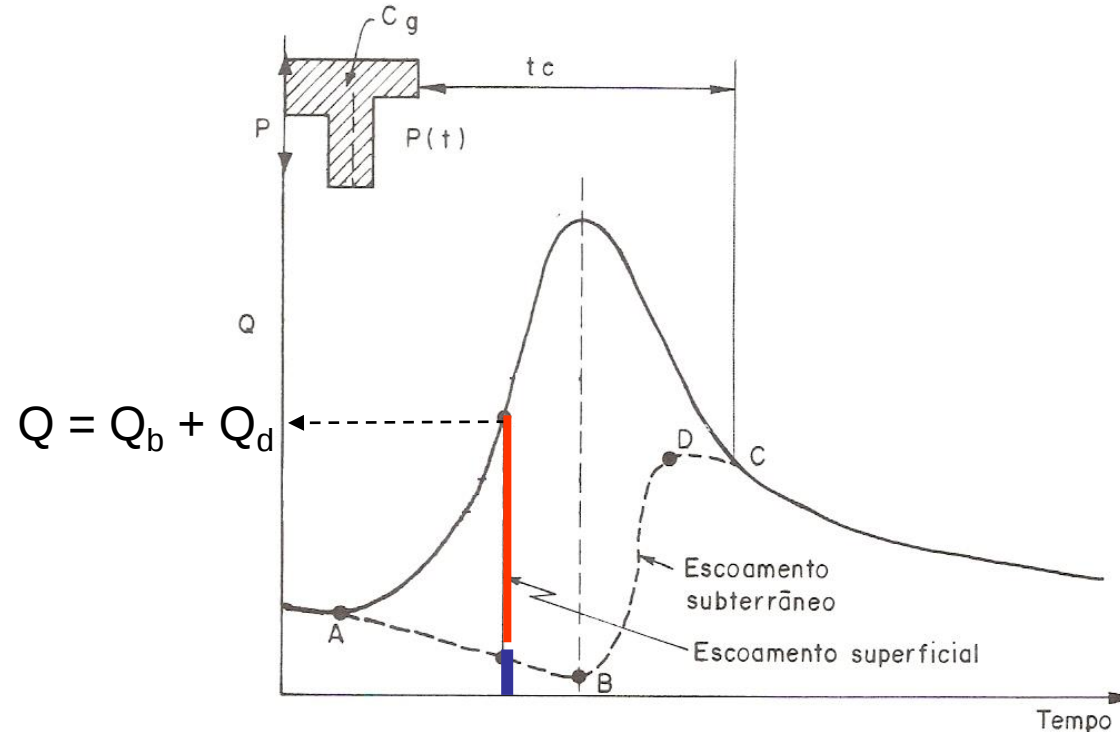
11

Gráfico que representa a vazão registrada em uma seção do rio em função do tempo.

Resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico entre a ocorrência da precipitação e a vazão na bacia hidrográfica

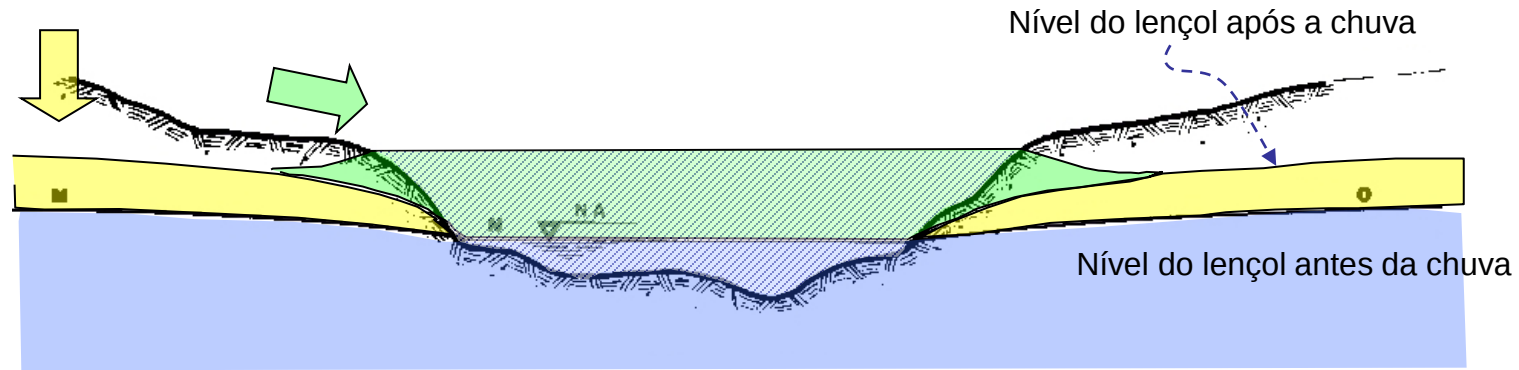
Contribuição total que produz escoamento da água na seção considerada:

- P direta sobre a superfície livre
- Escoamento superficial $\rightarrow Q_d$ - direto
- Escoamento subsuperficial $\rightarrow Q_b$ - base
- Escoamento subterrâneo $\rightarrow Q_b$ - base

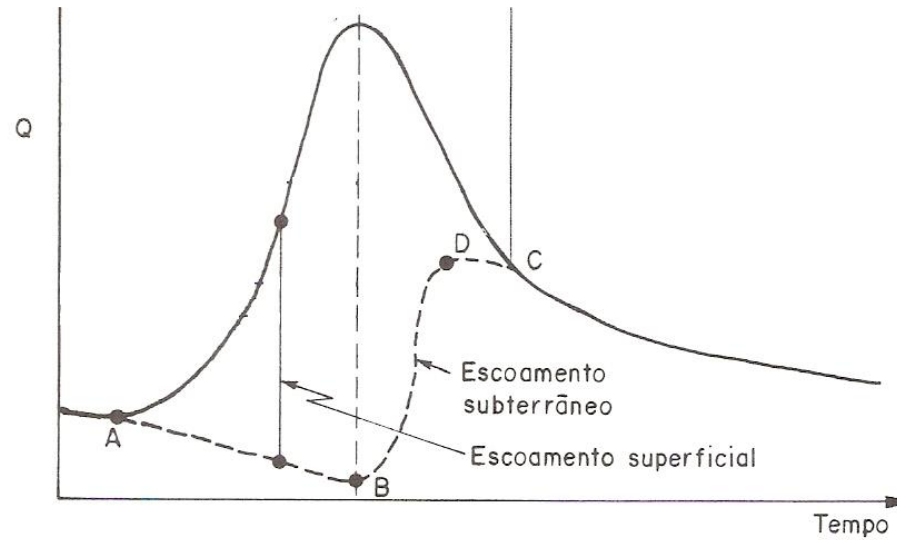


No início da precipitação

Para as enchentes maiores



Pinto et al. 1976



Grandezas características

- Nível de água
 - Altura atingida pela água na seção em relação a uma determinada referência
- Vazão (Q)
- **Vazão específica** ou contribuição unitária (Q/A)
- **Chuva efetiva (P_{ef})**
 - $P_{ef} = Vol_{esc.sup.} / \text{Área}$
- **Frequência de uma Q**
 - Número de ocorrência da Q num período de tempo
 - Período de retorno
- **Tempo de concentração**
 - Intervalo de tempo contado desde o início da chuva até que toda a bacia comece a contribuir para a seção em estudo.
 - Duração da trajetória da partícula que demora mais tempo para atingir a seção em estudo.

- **Coeficiente de deflúvio (c)**

- Coeficiente de escoamento superficial (runoff)
- Relação entre a quantidade de água escoada superficialmente e a quantidade de água precipitada na bacia

$$c = P_{ef} / P$$

$$c = Vol_{esc.sup.} / Vol_{precipitado}$$

Coeficiente pode ser relativo a:

- uma chuva isolada
- um intervalo de tempo onde várias chuvas ocorreram

Conhecido c para uma determinada chuva intensa de uma certa duração:

- Determina-se escoamento superficial de outras precipitações de intensidades diferentes, desde que a duração seja a mesma

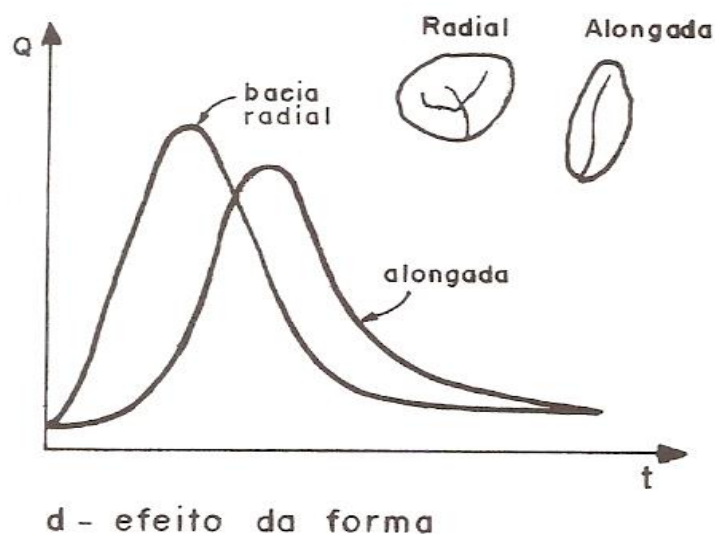
Fatores de influência do hidrograma

11

Relevo:

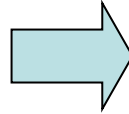
Densidade de drenagem, declividade do rio ou da bacia, capacidade de armazenamento e forma

Forma da bacia



Tipo radial: concentra o escoamento antecipando e aumentando o pico em relação a uma bacia mais alongada, que tem escoamento predominante no canal principal e percurso mais longo até a seção principal, amortecendo as vazões.

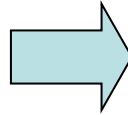
Boa drenagem e
grande declividade



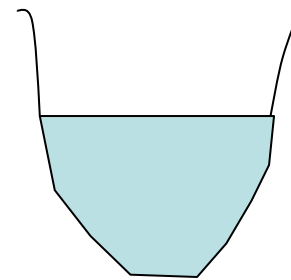
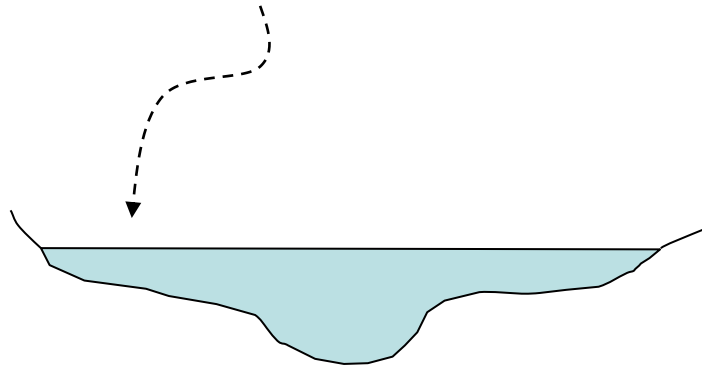
Hidrograma íngreme com pouco
escoamento de base.

Ex: bacias de cabeceira

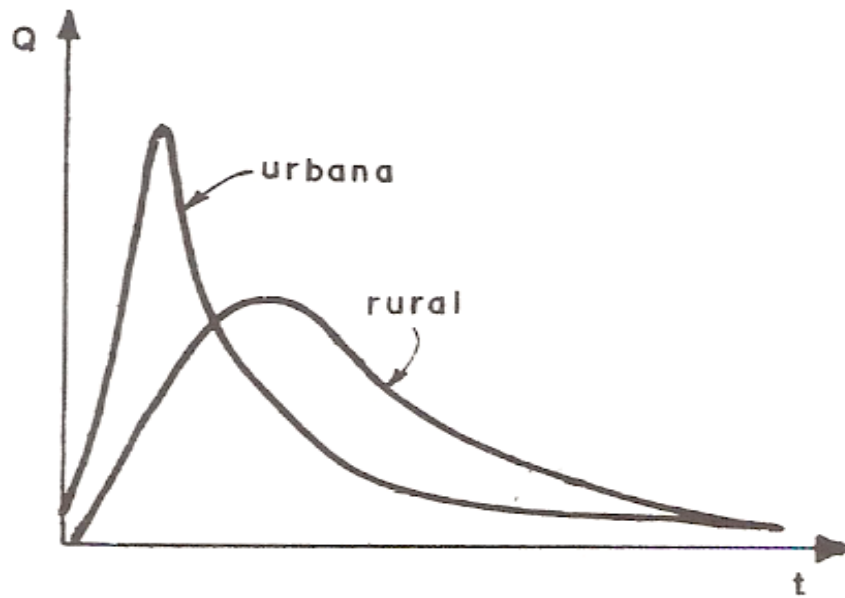
Grandes áreas de
inundação



Amortecem o escoamento e
regularizam o fluxo.



Cobertura da bacia

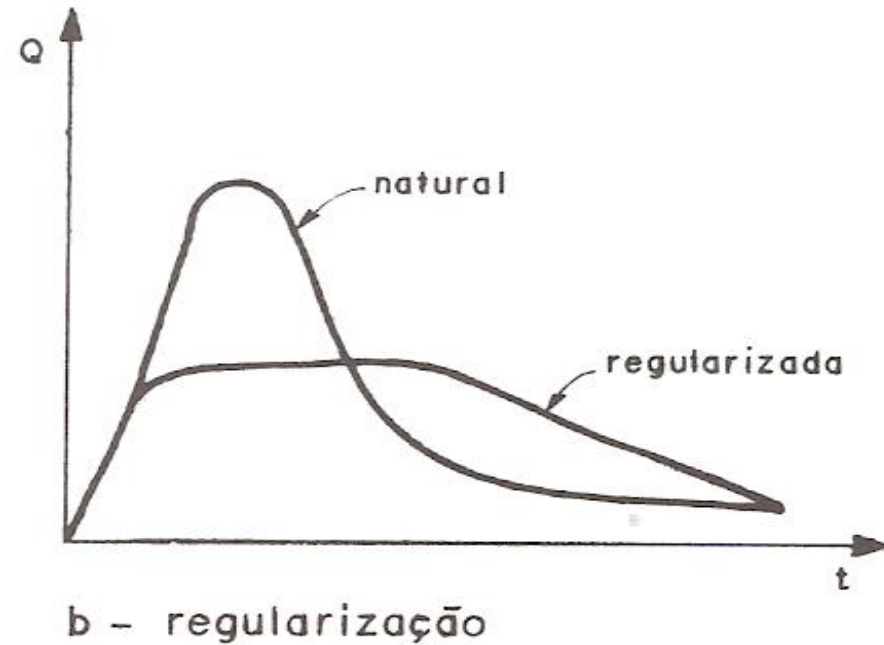


a - bacias rural e urbana

A vegetação tende a retardar o escoamento e aumentar as perdas por evapotranspiração.

Nas bacias urbanas, onde a cobertura é alterada (impermeável), acrescida de uma rede de drenagem mais eficiente, o escoamento superficial e o pico aumentam.

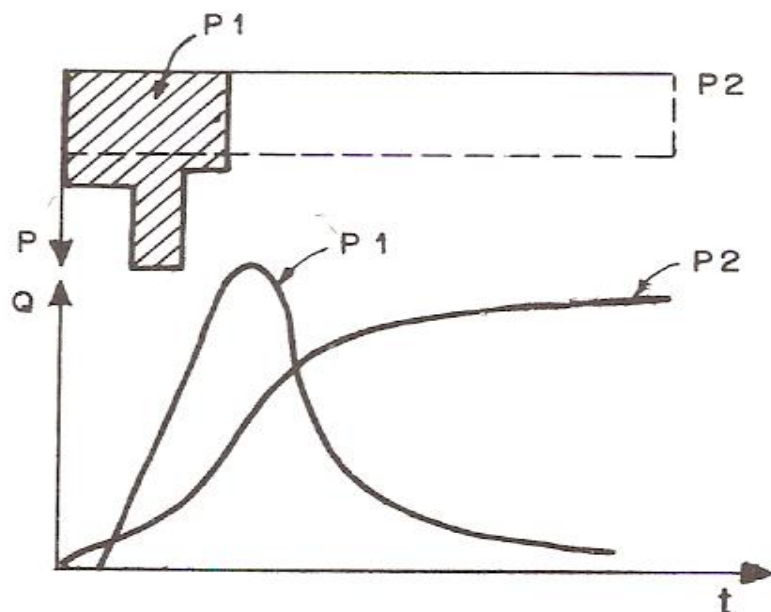
Modificações artificiais no rio



Um reservatório para regularização de vazão tende a reduzir o pico e distribuir o volume, enquanto a canalização tende a aumentar o pico (bacia urbana).

Distribuição, duração e intensidade da precipitação

Distribuição espacial: quando a precipitação se concentra na parte inferior da bacia, deslocando-se posteriormente para montante, o hidrograma pode até ter 2 picos.



c - Variação da duração e intensidade da precipitação

Distribuição temporal da precipitação: quando P é cte, a capacidade de armazenamento e t_c da bacia são atingidos, estabilizando valor do pico. Após o término da chuva, o hidrograma entra em recessão.

Bacias pequenas (<500km²):

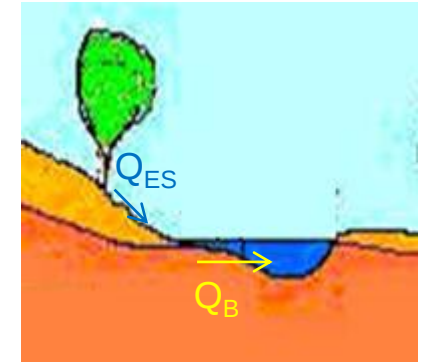
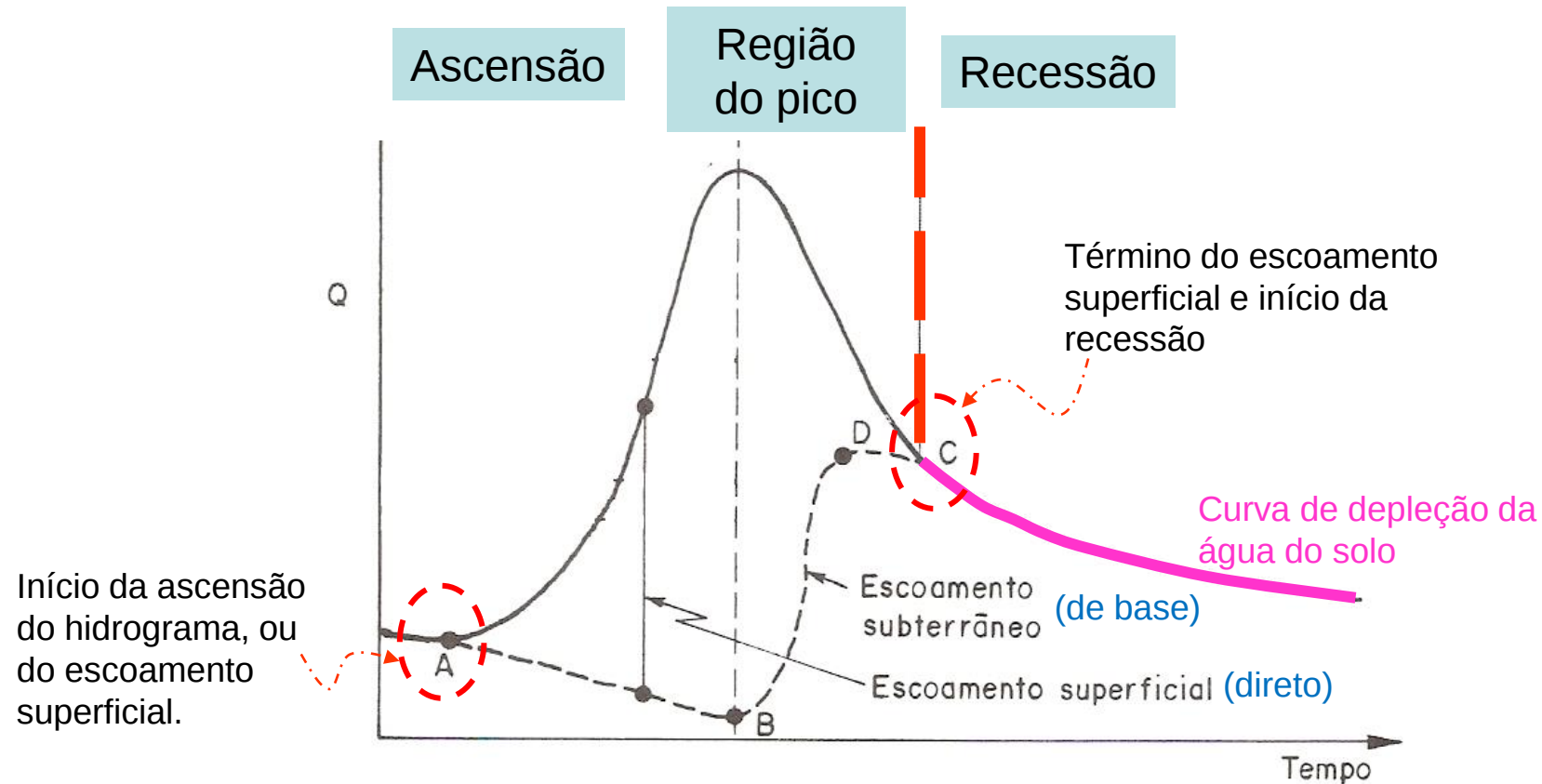
precipitações convectivas de alta intensidade, pequena duração e distribuída numa pequena área, podem provocar grandes enchentes.

Bacias maiores:

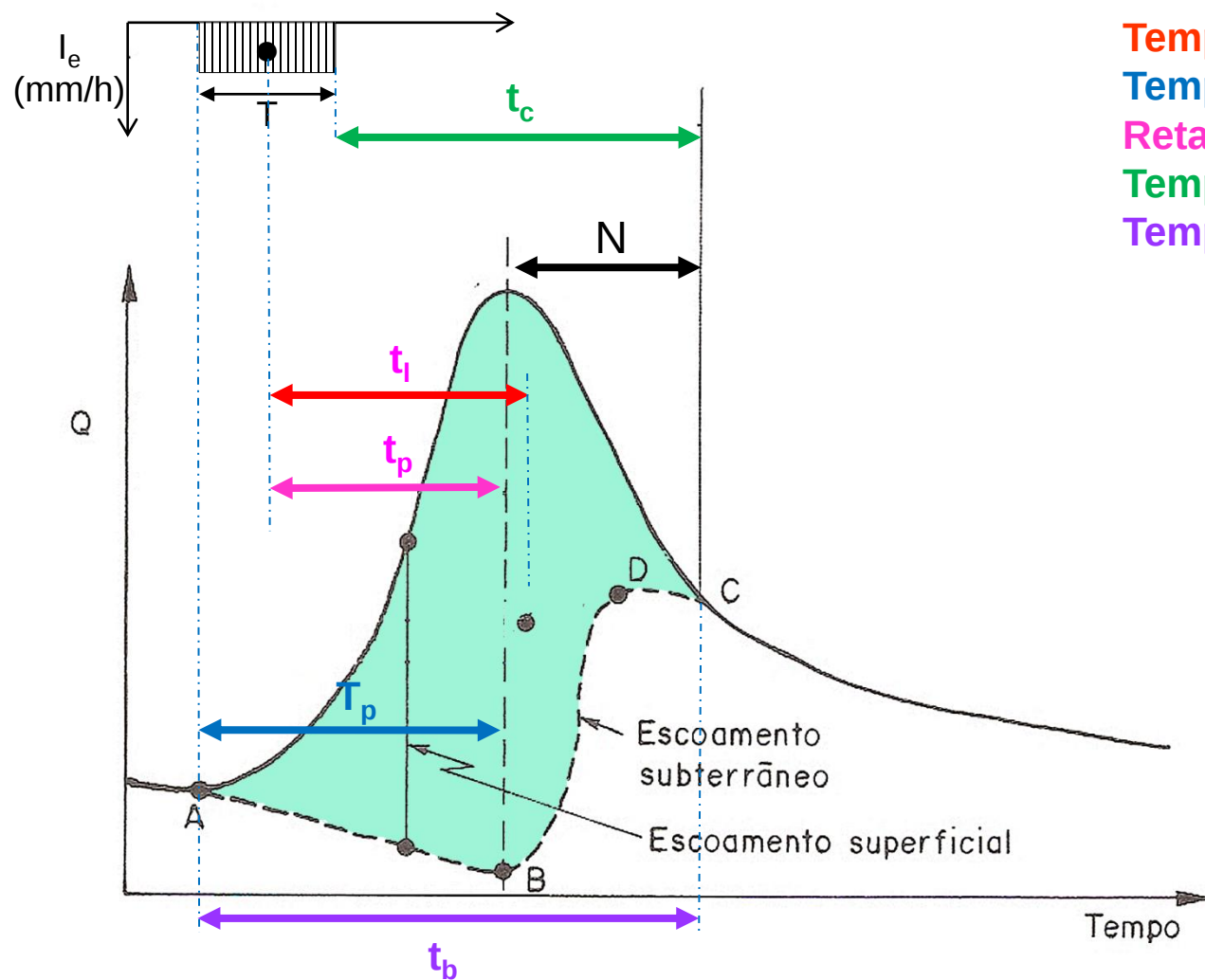
precipitações mais importantes são as frontais, que atingem grandes áreas com intensidade média.

Componentes do hidrograma

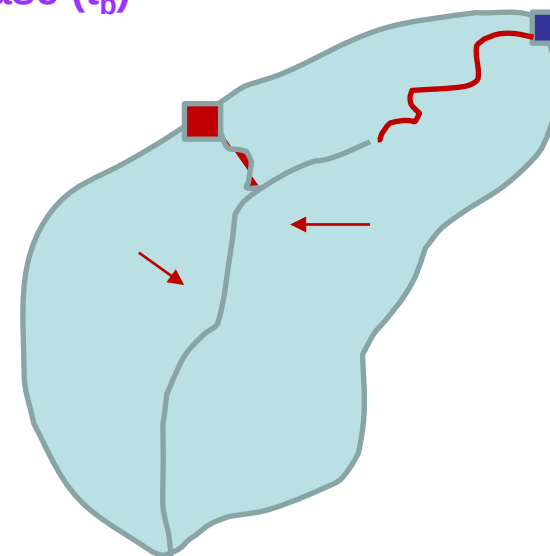
O hidrograma pode ser caracterizado por 3 partes:



$$Q = Q_B + Q_{ES}$$

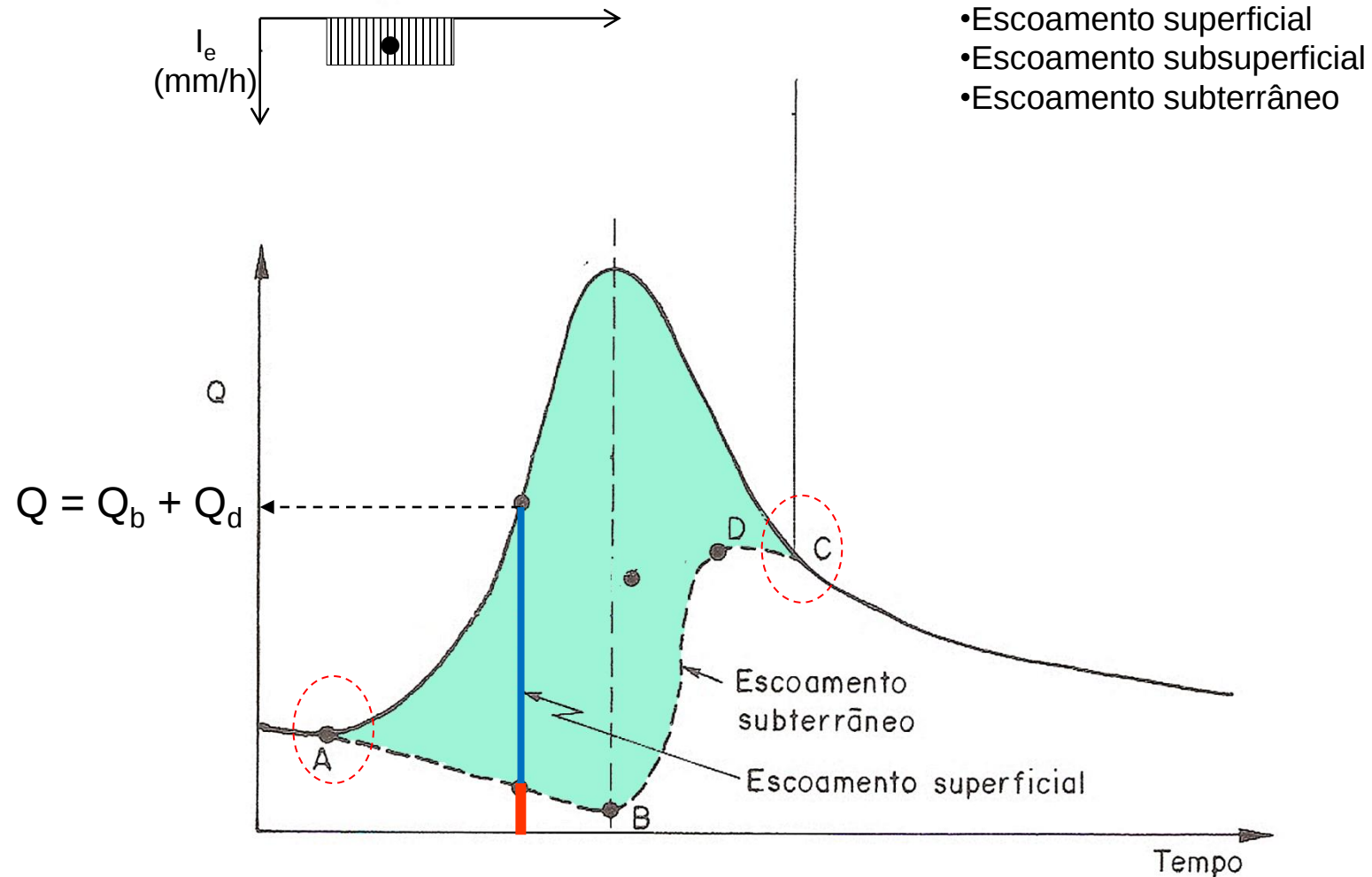


Tempo de retardamento (t_l)
 Tempo de pico (T_p)
 Retardamento do pico (t_p)
 Tempo de concentração (t_c)
 Tempo de base (t_b)



$T_{\text{azul}} > t_{\text{vermelho}}$

Separação do escoamento superficial



a) Método gráfico

Método 1:

Extrapolar a curva de recessão a partir do ponto C até encontrar o ponto B, localizado abaixo da vertical do pico.
Ligar os pontos A, B e C.
O volume acima da linha ABC é o escoamento superficial e o volume abaixo é o escoamento subterrâneo.

Método 2:

Ligar o ponto A e C por uma reta.

Método 3:

Extrapolar a tendência anterior ao ponto A até a vertical do pico, encontrando o ponto D.
Ligar os pontos D e C.

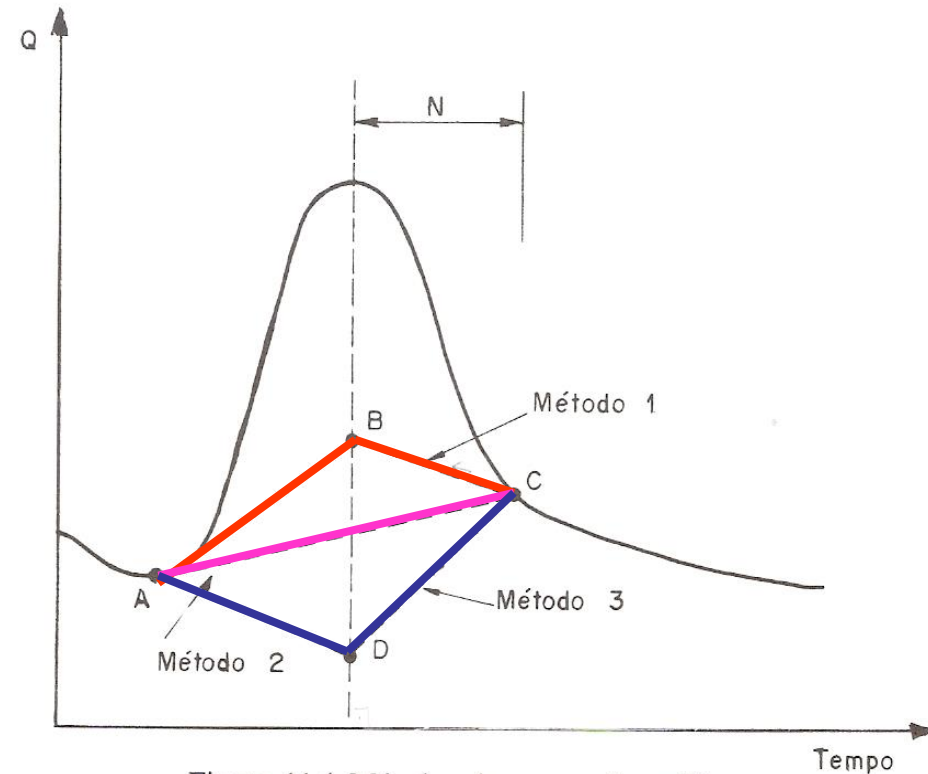
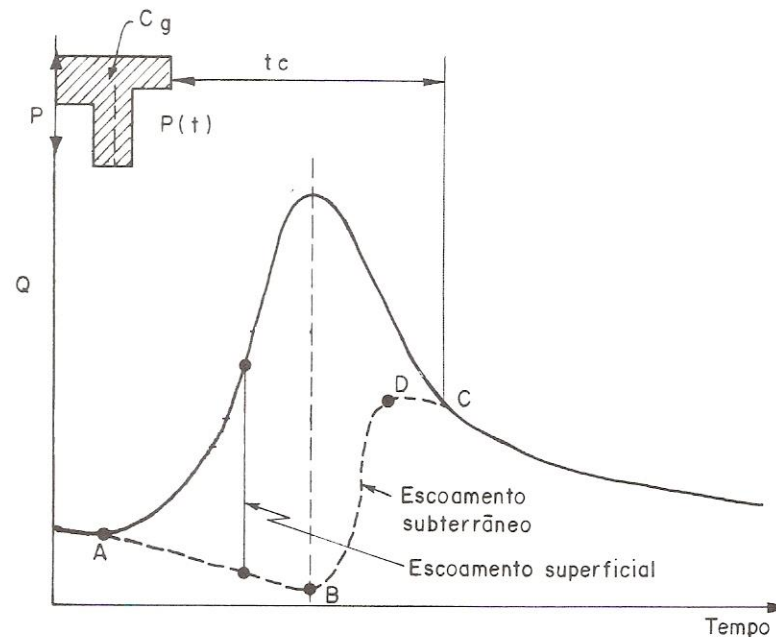


Figura 11.4. Métodos de separação gráfica

Método alternativo:

Prolongar tendência do hidrograma antes do ponto A até o ponto B (abaixo do pico) e da recessão a partir de C. Desenhar a curva restante definindo o ponto D



Extrapolar o trecho anterior ao escoamento superficial para frente até o ponto B, abaixo do pico.
Extrapolar o trecho posterior ao escoamento superficial para trás. Unir as duas extrapolações entre o tempo de pico e o tempo do ponto de inflexão da recessão.

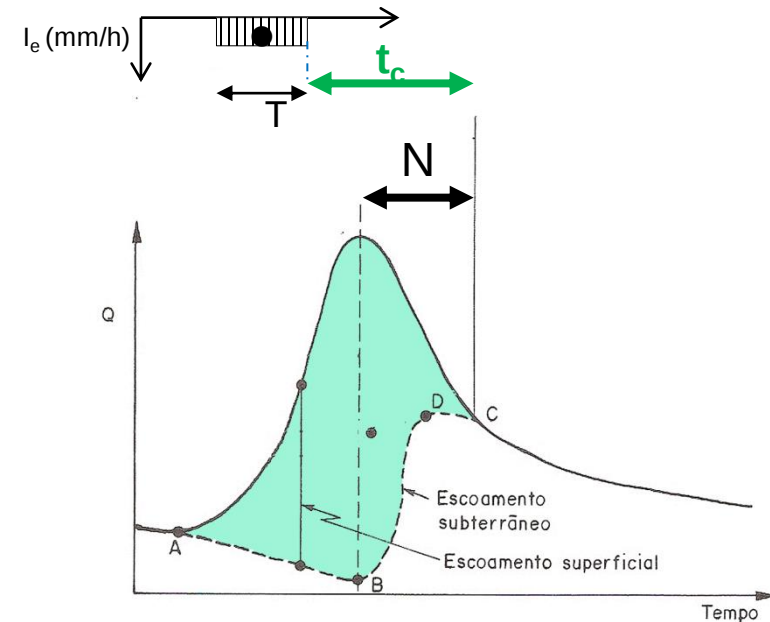
b) Determinação do ponto C

Critério 1 - Linsley et al. (1975)

$$N = 0,827 A^{0,2}$$

N – tempo entre pico do hidrograma e o tempo do ponto C (dias)

A – área da bacia (km²)



Critério 2

Pelo tempo de concentração: Tempo entre fim da precipitação efetiva e o final do escoamento superficial (ponto C).

$$t_c = 0,188 L^{0,77} S^{-0,385}$$

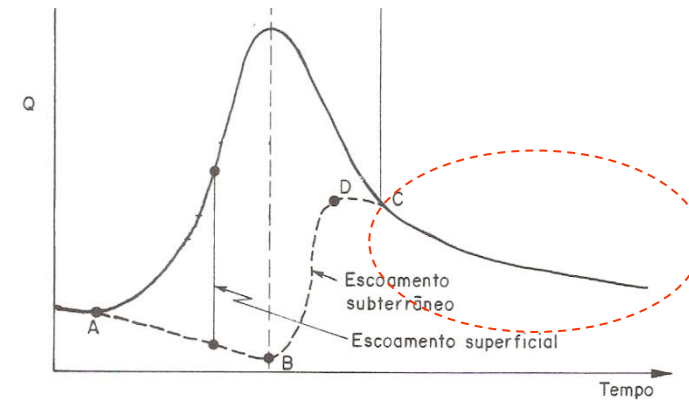
Critério 3

No hidrograma, a curva após C é chamada de curva de depleção da água do solo.

A equação da curva de depleção pode ser deduzida, considerando a seguinte hipótese simplificadora:

$$\frac{dQ}{dt} = -\alpha Q \quad \Rightarrow \quad \text{Ver em Balanço hídrico - } \Delta S \neq 0$$

Constante para o aquífero em particular: **constante de depleção**



$$\int_{Q_0}^Q \frac{dQ}{Q} = -\alpha \int_{t_0}^t dt \quad \Rightarrow \quad \underbrace{\ln \frac{Q}{Q_0} = -\alpha(t-t_0)}_{\text{Reta}} \quad \Rightarrow \quad Q = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$$

Critério 4 - Inspeção visual

Plotagem das vazões numa escala mono-log (vazão na escala logarítmica).

Como a recessão tende a seguir uma equação exponencial, numa escala logarítmica a mesma tende para uma reta. Quando ocorre modificação substancial da declividade da reta de recessão, o ponto C é identificado.

Quando ocorre mais de uma modificação

Exercício 1

11

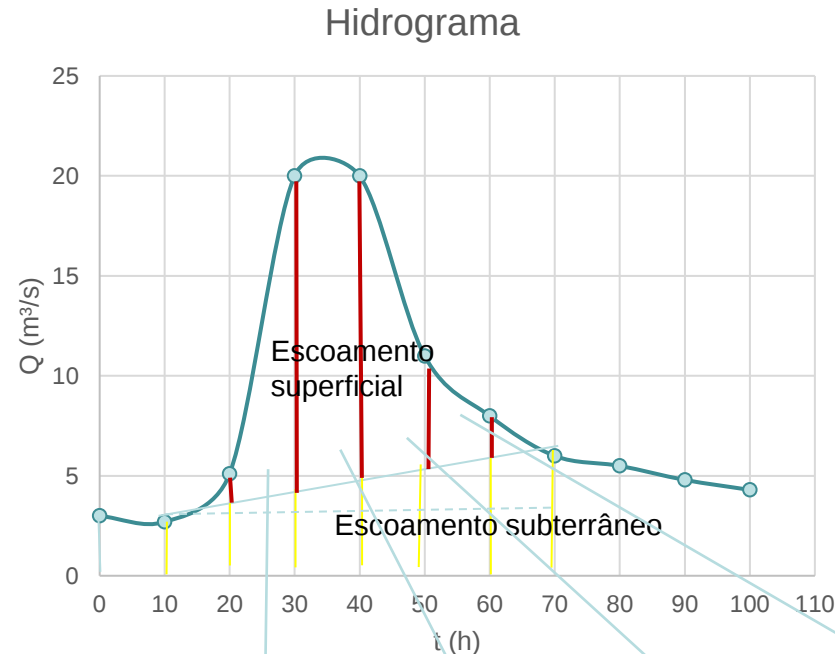
Para o hidrograma dado, separar o escoamento de base e estimar a chuva efetiva total pelo método da linha reta. Área da bacia de drenagem é de 100 km².

t (h)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q(m ³ /s)	3	2,7	5,1	20	20	11	8	6	5,5	4,8	4,3

Solução

11

Excel



Q=Qb + Qd			Qb	Qd	
t (h)	Q(m³/s)		Q base (subterr)	Q direto (superf)	
0	3		3	0	
10	2.7		2.7	0	
20	5.1		3.25	1.85	Qd1
30	20		3.8	16.2	Qd2
40	20		4.35	15.65	Qd3
50	11		4.9	6.1	Qd4
60	8		5.45	2.55	Qd5
70	6	-0.3	6	0	
80	5.5	-0.1	5.5	0	
90	4.8	-0.1	4.8	0	
100	4.3	-0.1	4.3	0	

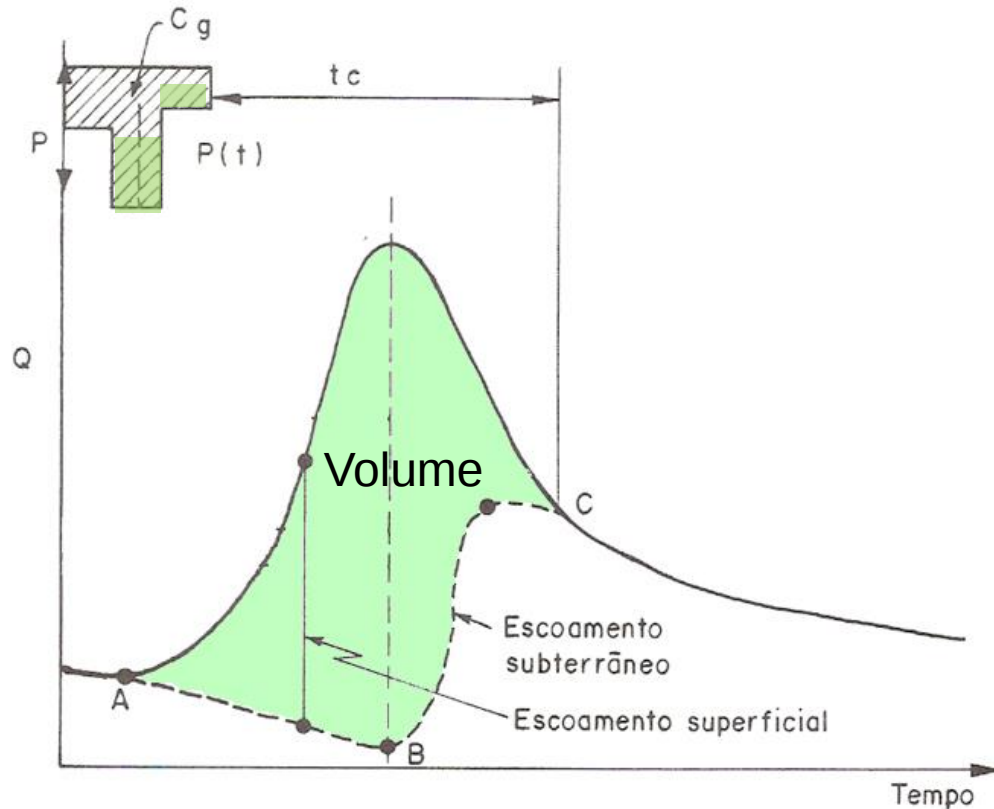
$$\frac{Qd1 \times dt}{2} \quad \frac{(Qd1 + Qd2) \times dt}{2} \quad \frac{(Qd2 + Qd3) \times dt}{2} \quad \frac{(Qd3 + Qd4) \times dt}{2} \quad \frac{(Qd4 + Qd5) \times dt}{2} \quad \frac{Qd5 \times dt}{2}$$

$$\ln \frac{Q}{Q_0} = -\alpha(t - t_0)$$

Área acima da reta:

$$\text{Vol} = (Qd1 + Qd2 + \dots + Qd5) \times dt$$

Hietograma efetivo



Chuva efetiva total

$$\sum R_e = \frac{Vol}{A_{bacia}}$$

Hietograma efetivo

$$c = \frac{\sum R_e}{\sum P}$$

Antes de começar o escoamento superficial:

$$c_1 = 0$$

Admitindo que $c_2 = c_3 \dots = \alpha$ (método do coeficiente de escoamento constante):

$$\alpha = \frac{\sum R_e}{\sum P - I_a}$$

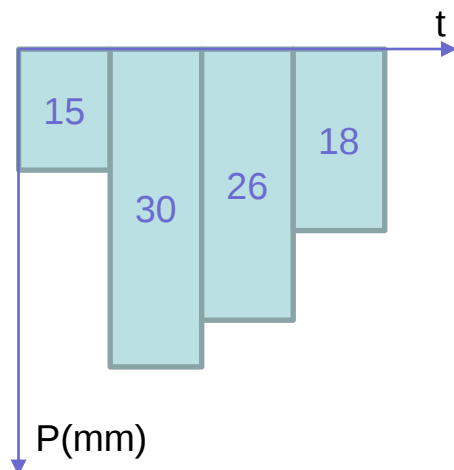
I_a : perdas iniciais (retenções, interceptações)

Exercício 2

(Continuando exercício 1)

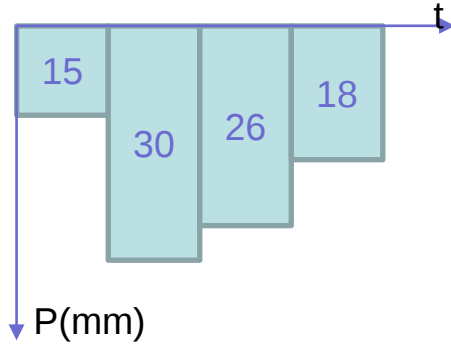
Supondo que a chuva observada que gerou o Hidrograma do exercício 1 foi o apresentado na tabela ao lado. Achar o hietograma efetivo usando o método do coeficiente de escoamento constante.

t (h)	P (mm)
0-10	15
10-20	30
20-30	26
30-40	18



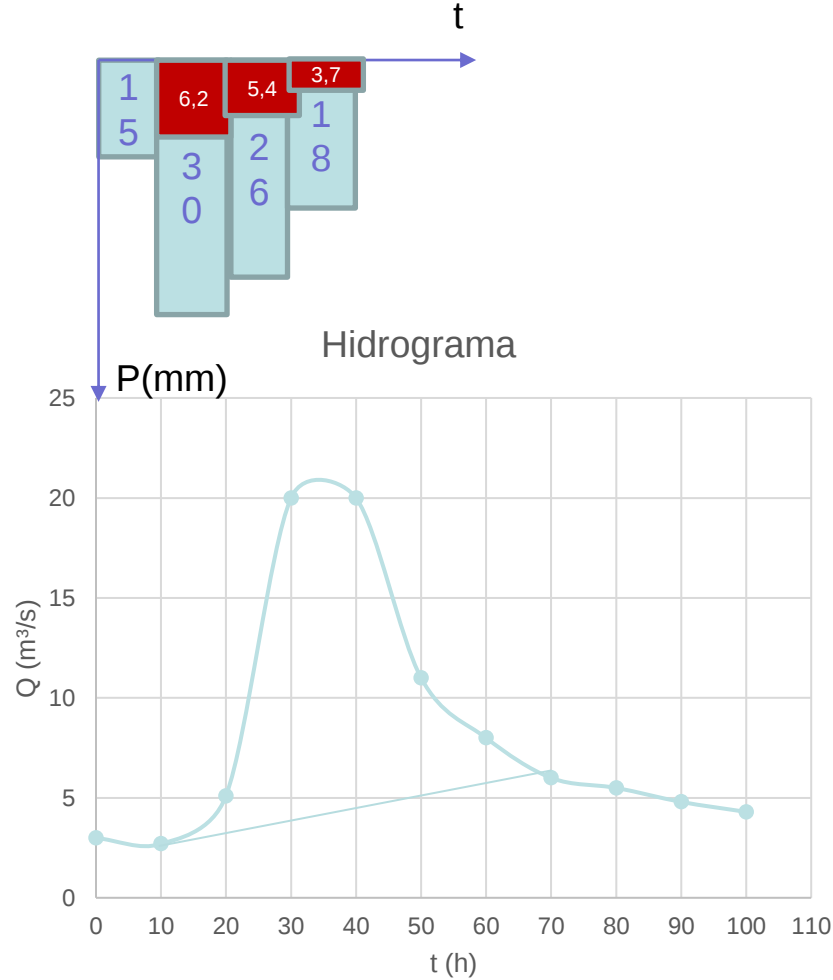
11

Solução:



Chuva total:

$$\sum P = 15 + 30 + 26 + 18 = 89 \text{ mm}$$



$$\alpha = \frac{\sum R_e}{\sum P - I_a} = \frac{15,246}{89 - 15} = 0,206$$

$$r_{e,1} = 0$$

$$r_{e,2} = \alpha P_1 = 0,206 \times 30 = 6,18 \text{ mm}$$

$$r_{e,3} = 0,206 \times 26 = 5,356 \text{ mm}$$

$$r_{e,4} = 0,206 \times 18 = 3,708 \text{ mm}$$

- Coleção ABRH
- Pinto et al. 1976. Hidrologia Básica. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda.
- Villela & Mattos. 1975. Hidrologia Aplicada. São Paulo: McGrawHill.