

13 – Hidrograma Unitário e Hidrograma Unitário Sintético

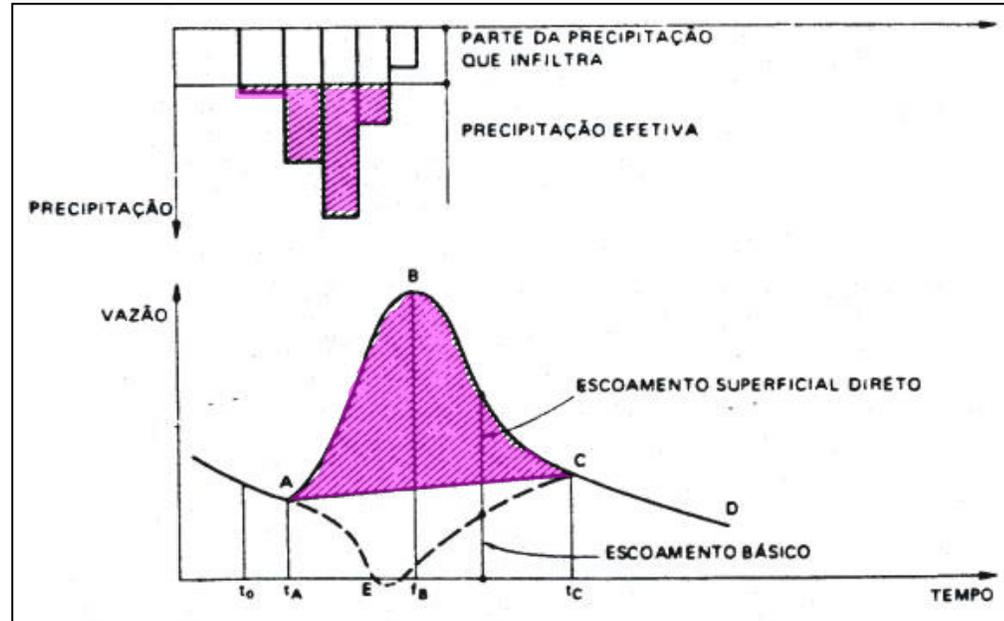
- Estimar vazão pelo método do hidrograma unitário (HU)
- Estimar vazão pelo método do hidrograma unitário sintético (HU sintético)

13.A - Hidrograma Unitário

13

Introdução

Hidrograma



Hidrograma Unitário - Hidrograma de escoamento superficial direto (HED), onde a área sob a curva corresponde a um **volume unitário de escoamento superficial direto**, resultante de uma chuva efetiva (parcela da chuva a partir da qual ocorre contribuição ao escoamento) com **intensidade e duração unitárias**.

Chuva efetiva (P_{ef}) unitária

$P_{ef} = 1 \text{ cm ou } 1 \text{ mm ou } 1 \text{ polegada}$

Hidrograma é o gráfico que representa a vazão registrada em uma seção de um curso d'água em função do tempo. Reflete a resposta da bacia hidrográfica, em função de suas características fisiográficas que regem a relação entre chuva e escoamento, dada uma precipitação e a contribuição do aquífero (escoamento de base).

Com a maior facilidade de se obter dados de precipitação foram criados métodos que correlacionam a vazão aos dados pluviométricos.

Sherman (1932) propôs o Hidrograma Unitário (HU) como sendo uma das formas de representar a resposta das vazões na saída da bacia em decorrência de uma precipitação sobre a mesma.

Maioria das técnicas práticas de estimativa do escoamento superficial a partir da precipitação é baseada em:

- Técnicas de correlação entre volumes observados de chuva e escoamento superficial
- Técnicas de Hidrograma Unitário

Método do hidrograma é uma técnica “Black box”, pois não permite nenhum entendimento dos processos envolvidos. Não depende de leis físicas, senão de dados observados. A separação em dois escoamentos também não apresenta alta precisão.

Método do Hidrograma Unitário

13

MODELO PARA TRANSFORMAR *CHUVA EFETIVA* em *VAZÃO SUPERFICIAL*, baseado em **CONCEITOS LINEARES**, ou seja, suposições simplificadoras de que a bacia hidrográfica comporta-se como um **sistema linear e invariante no tempo**, conseqüentemente, permitindo a avaliação de uma **resposta constante**.

Procedimento para derivar o **hidrograma do escoamento superficial direto (HED)** advindo de:

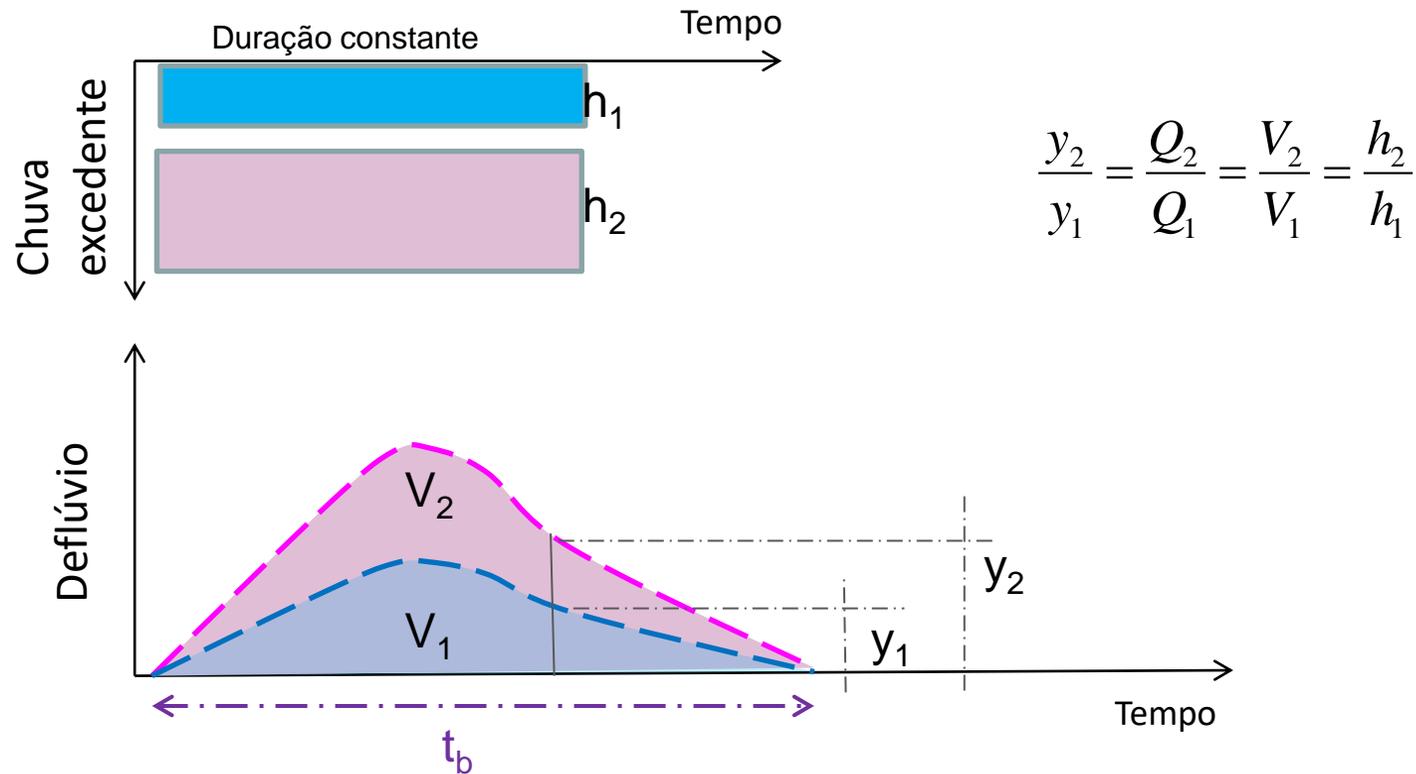
uma **chuva efetiva** — 

Estas simplificações se baseiam em 3 princípios:

1. Linearidade
2. Invariância no tempo
3. Superposição

Princípio da Linearidade

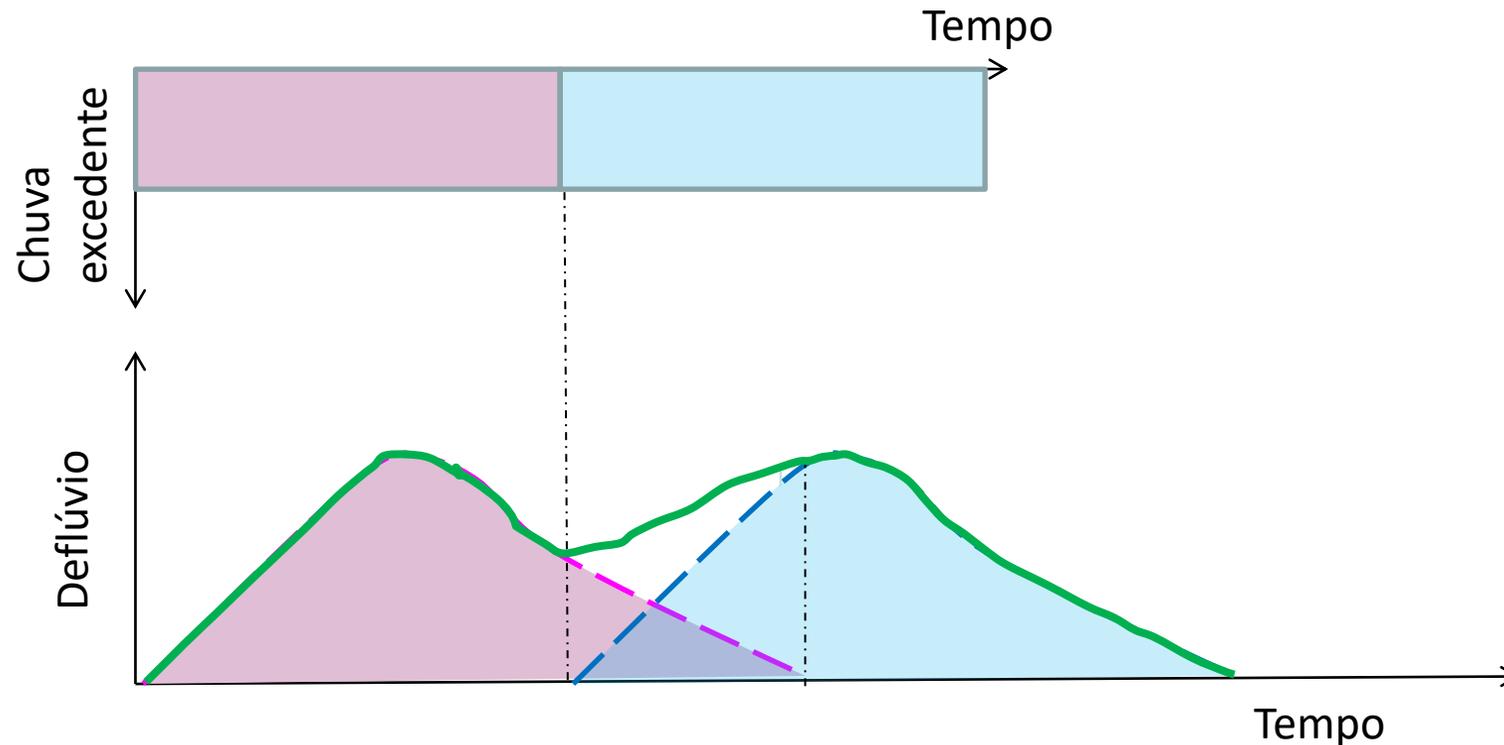
Duas **chuvas efetivas** de **mesma duração**, mas com **volumes escoados diferentes**, resultam em hidrogramas superficiais, cujas ordenadas são proporcionais aos correspondentes volumes escoados.



Para chuvas de iguais durações, as durações dos escoamentos superficiais correspondentes são iguais (mesmo tempo de base t_b)

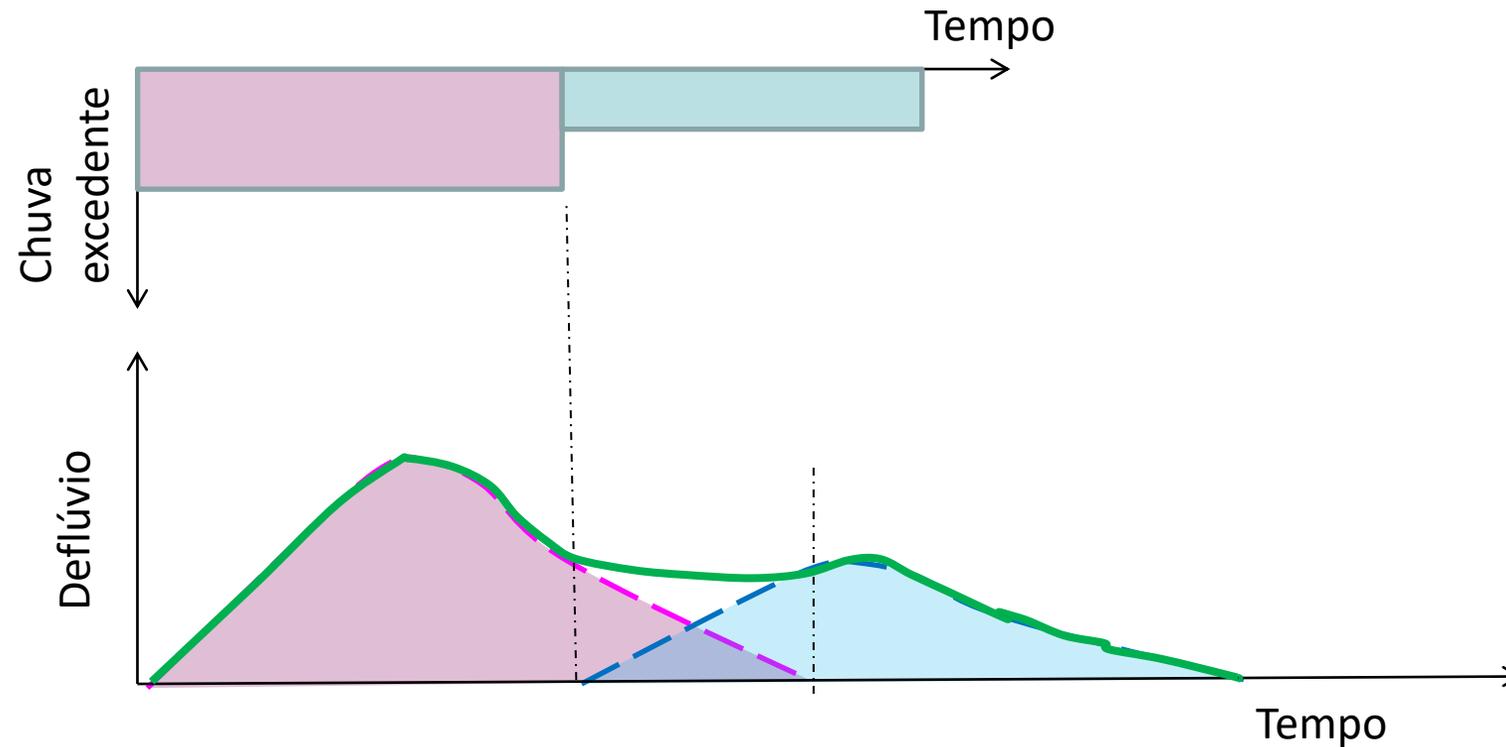
Princípio da Invariância no Tempo

Uma mesma chuva efetiva produzirá a qualquer tempo, sempre um mesmo hidrograma superficial, ou seja, precipitações anteriores não influenciam a distribuição no tempo do escoamento superficial de uma dada chuva.



Princípio da Superposição

Hidrograma devido uma chuva efetiva pode ser dividido em uma série de hidrogramas superficiais parciais, cada um devido uma chuva efetiva parcial.



Limitações do Método do HU

13

a – “Chuvas efetivas uniformemente distribuídas pela bacia”

Não ocorre em grandes bacias, especialmente as longas e estreitas.

→ Divisão em sub-bacias + modelo de amortecimento

b – “Chuvas efetivas com intensidade constante ao longo do tempo”

Limitações em pequenas bacias, que são mais sensíveis a pequenas variações de P_{ef} .

→ Adoção de pequenas durações de chuva ou Δt pequenos nas divisões de chuvas complexas

c – Linearidade: “Duas chuvas com mesmo t_d e diferente $i \rightarrow$ mesmo t_b ”

Efeitos de calha podem fazer com que os hidrogramas variem substancialmente com as intensidades de chuva de mesma duração.

d – “Princípio da invariância no tempo”

Variações sazonais que costumam ocorrer tem efeitos significativos nos escoamentos superficiais (bacias rurais e florestadas).

É de se esperar para chuvas efetivas semelhantes diferentes respostas, dependendo da época de ocorrência.

Por exemplo, se é época de crescimento ou não das plantas.

Determinação do HU

Determinação do HU a partir de:

- A. Precipitação efetiva isolada
- B. Precipitações efetivas complexas

A duração da chuva associada ao HU deve estar clara

HU(t_d)

relacionado a uma chuva efetiva de 1mm ou 1cm, caída num intervalo de tempo t_d

$$t_d < t_c$$

Para grandes bacias: $t_d = 24$ h ou 12 h

Para pequenas bacias: $t_d = \frac{1}{2} t_c$ ou $\frac{1}{4} t_c$

Ordenadas do HU

$u(t_d, t)$

t : Tempo contado a partir do início da chuva efetiva

Valores recomendados por Sherman:

A (km ²)	t_d (h)
>2600	12 a 24
260 - 2600	6, 8 ou 12
50	2

A – Precipitação efetiva isolada

13

a) Dados

Registros simultâneos de P e Q

(Se difícil de obter → HU sintético)

Procurar nos registros **chuvas isoladas**:

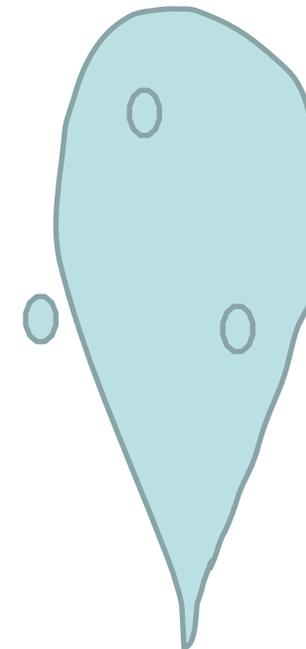
- com alta intensidade
- o mais constante possível
- com curta duração
- com indicação que foram distribuídas uniformemente pela bacia

b) Separar os componentes do hidrograma

c) Determinar o volume do escoamento superficial e altura da chuva efetiva

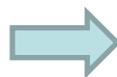
d) Usando princípio da linearidade, ajustar as ordenadas do hidrograma do escoamento direto (HED) para corresponder com uma unidade de chuva efetiva, por exemplo, 1 cm de chuva efetiva

A duração da chuva associada ao HU deve estar clara



$$\begin{array}{l} P_{ef} \rightarrow Q_{HED} \\ 1 \text{ cm} \rightarrow Q_{HU} \end{array}$$

P_{ef} em cm



$$Q_{HU} = Q_{HED} / P_{ef}$$

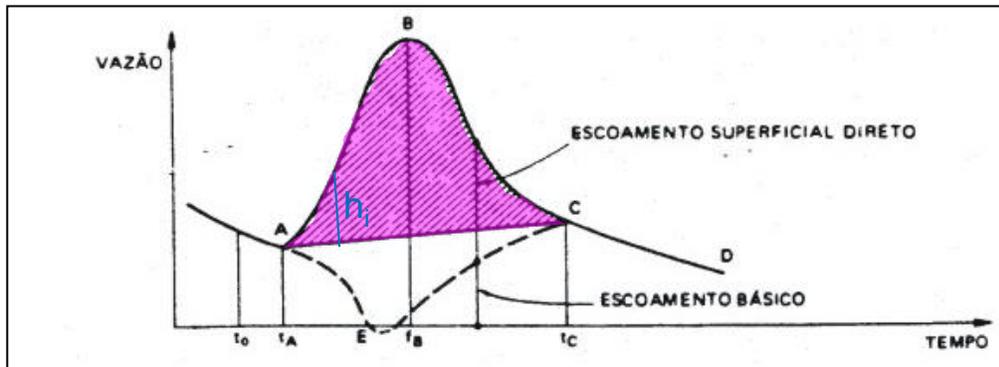
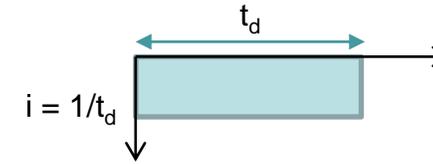
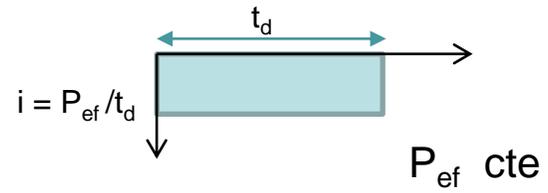
$$u(t_d, t) = h(t_d, t) / P_{ef}$$

Ordenadas do HU

$$u(t_d, t)$$

Ordenadas do HED

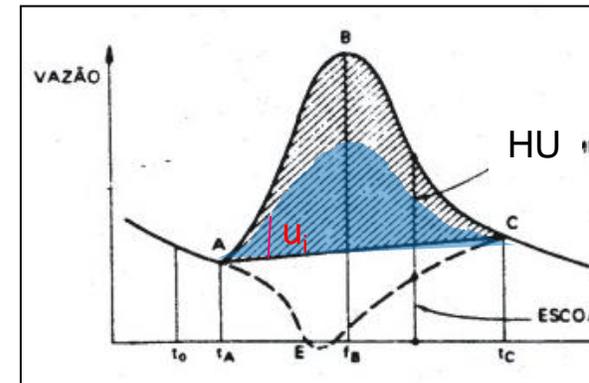
$$h(t_d, t)$$



$$P_{ef}$$

Ordenadas do HED:

$$h(t_d, t)$$



$$P_{ef} = 1$$

Ordenadas do HU:

$$u(t_d, t) = h(t_d, t) / P_{ef}$$

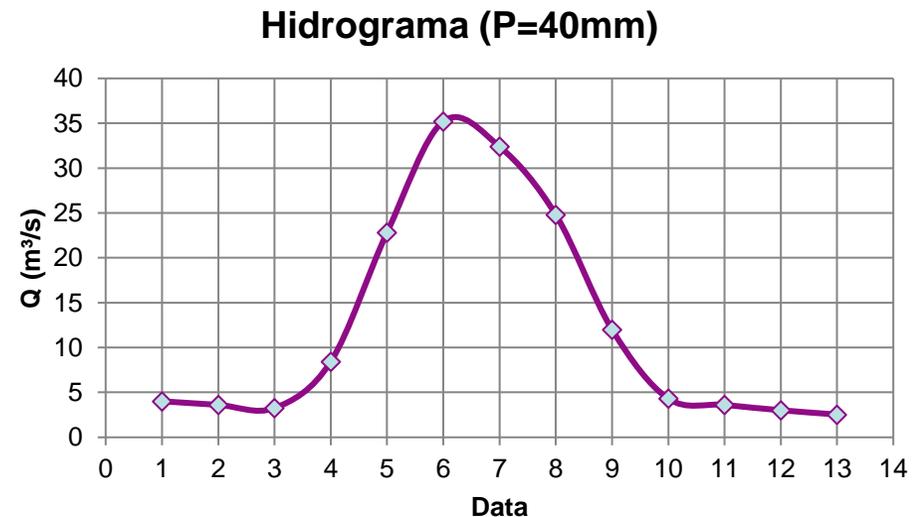
Exercício 1

Ocorreu uma precipitação de 40 mm sobre uma bacia hidrográfica, sendo que 34% desta precipitação se transformou em escoamento superficial com duração t_d .

Determine:

- Volume do escoamento superficial
- Área da bacia
- O hidrograma unitário: $HU(t_d)$
- Vazão de pico do HED de uma chuva efetiva de 22mm

O hidrograma observado devido a chuva citada é dado ao lado.



Data	Q(m ³ /s)	Q _{base}	HED P _{ef} = mm	HU	HED P _{ef} =22mm
1	4,00				
2	3,60				
3	3,24				
4	8,40				
5	22,80				
6	35,20				
7	32,40				
8	24,80				
9	12,00				
10	4,30				
11	3,60				
12	3,00				
13	2,52				

Exercício 2

13

Dado $HU(t_d)$ do exercício 1, determinar o hidrograma do escoamento direto (HED), supondo o hietograma efetivo formado por 3 precipitações de duração t_d e valendo 9mm, 28mm e 12mm, defasadas de 1d

B – Precipitações efetivas complexas

13

Inexistência de tempestades isoladas.

- Somatório de convoluções para os diversos blocos de chuva efetiva, com intensidade uniforme, que compõem a chuva complexa.
- Chuva complexa: 1, 2, ... **m** chuvas com **intensidades constantes** e **mesma duração t_d**

Incógnita: HU

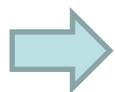
apresentado na forma de vetor $[u_1, u_2, \dots, u_p]$
 logo, tempo de base do HU: $t_B = p \times t_d$

P_{ef}

também apresentado na forma discreta $[P_1, P_2, \dots, P_m]$
 logo, tempo de duração do tempo chuvoso: $t = m \times t_d$

Q_i

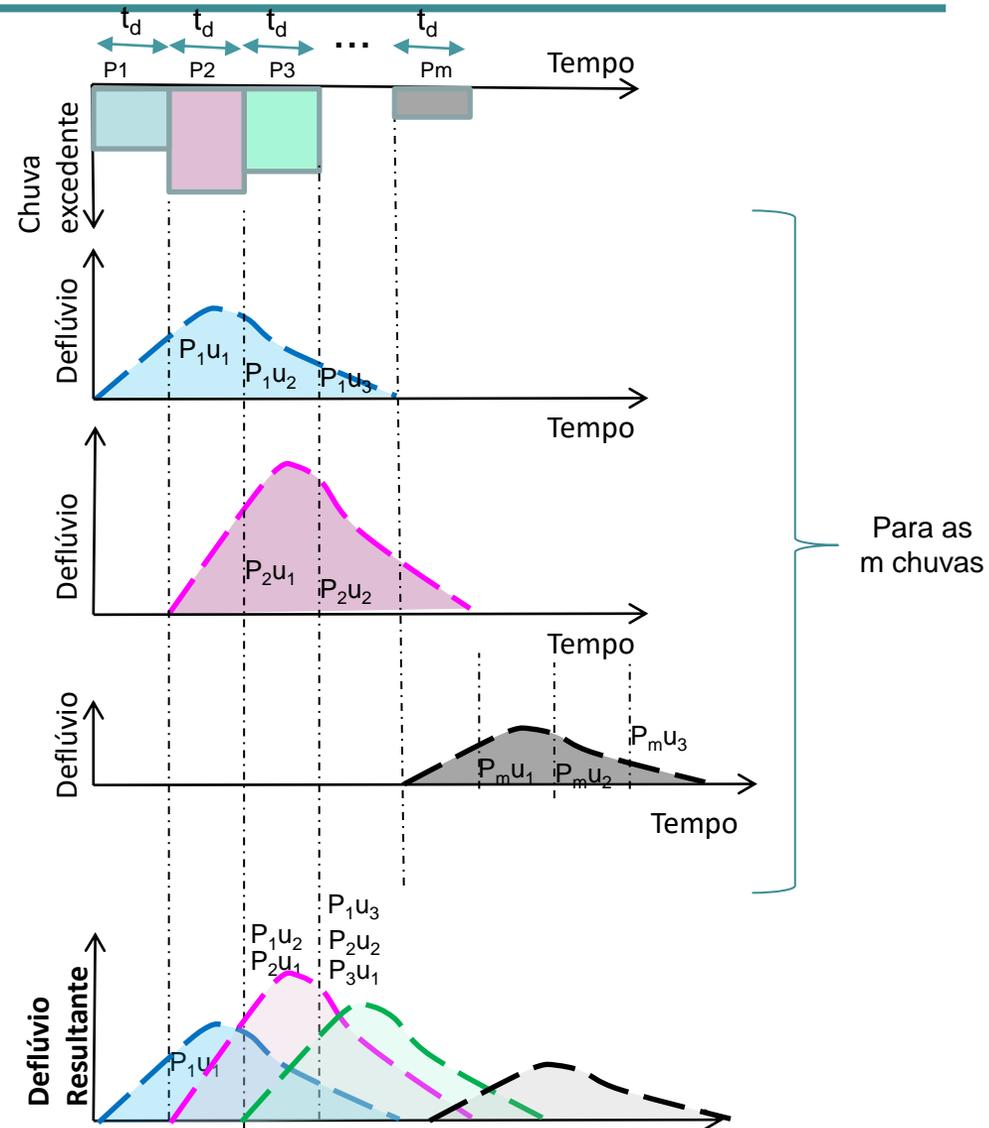
também discreto $[Q_1, Q_2, \dots, Q_n]$
 logo, tempo de duração do escoamento direto: $t_Q = n \times t_d$



Pode-se observar:

$$n = p + m - 1$$

- Número de chuvas
- Número de ordenadas do HU
- Número de ordenadas do Hidrograma final



Para determinar

Sistema de equações

Conhecido

Conhecido

t	P_{ef}	$HU(\Delta t)$	Q'_1	Q'_2	...	Q'_m	$Q = \sum Q'$
0		0	0	0	0	0	0
Δt	P_1	u_1	$P_1 u_1$	0	0	0	$Q(\Delta t)$
$2\Delta t$	P_2	u_2	$P_1 u_2$	$P_2 u_1$	0	0	$Q(2\Delta t)$
$3\Delta t$	P_3	u_3	$P_1 u_3$	$P_2 u_2$	\vdots	\vdots	$Q(3\Delta t)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	$P_2 u_3$	\vdots	$P_m u_1$	\vdots
\vdots	P_m	u_p	$P_1 u_p$	\vdots	\vdots	$P_m u_2$	\vdots
\vdots				$P_2 u_p$	\vdots	$P_m u_3$	\vdots
\vdots					\vdots	\vdots	\vdots
$(p+m-1)\Delta t$						$P_m u_p$	$Q[(p+m-1)\Delta t]$

Solução do sistema de equações fornecerá $HU(t_d)$

Número de equações > número de incógnitas \rightarrow em alguns, solução com valores negativos das ordenadas de HU \rightarrow deve-se procurar outra solução

Exercício 3

13

Derivar o $HU(t_d=1h)$ para uma bacia de 105 km^2 , onde **HED** e o **hietograma efetivo** são dados a seguir.

$P_1=15,2\text{mm}$; $P_2=20,3\text{mm}$; $P_3=0$; $P_4=30,5\text{mm}$

Q_i	$P_{ef,1}=15,2\text{mm}$	$P_{ef,2}=20,3\text{mm}$	$P_{ef,3}=0$	$P_{ef,4}=30,5\text{mm}$
12,4				
30,7				
24,5				
34,4				
31,9				
12,7				
4,6				
1,81				
0,68				
0,34				

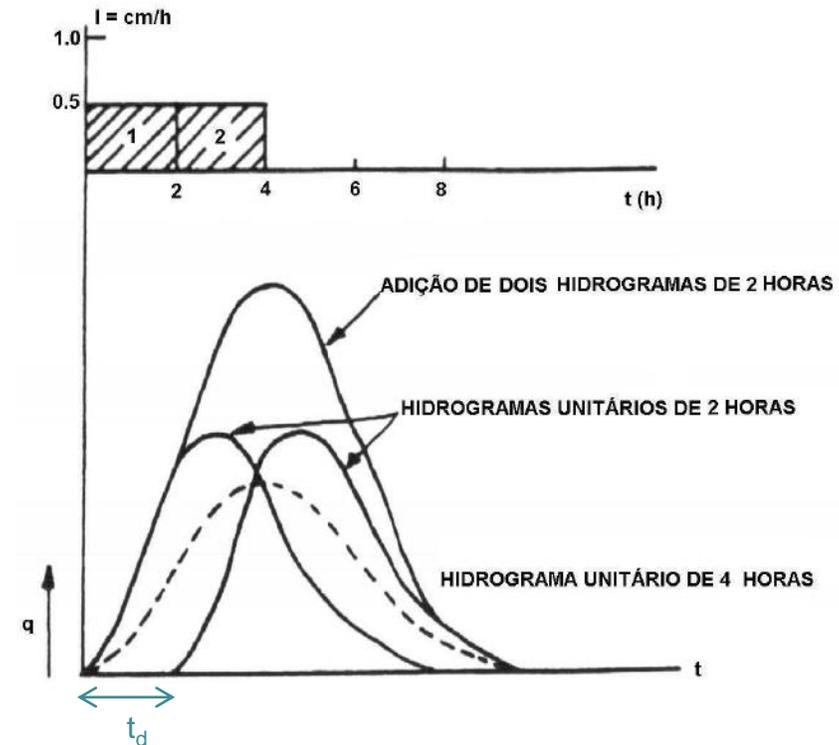
Conversão do HU para diferentes t_d

Conversão de um $HU(t_d)$ para outro $HU(t_d')$

Caso 1: Transformação para um t_d' maior e múltiplo de t_d

A duração da chuva associada ao HU deve estar clara

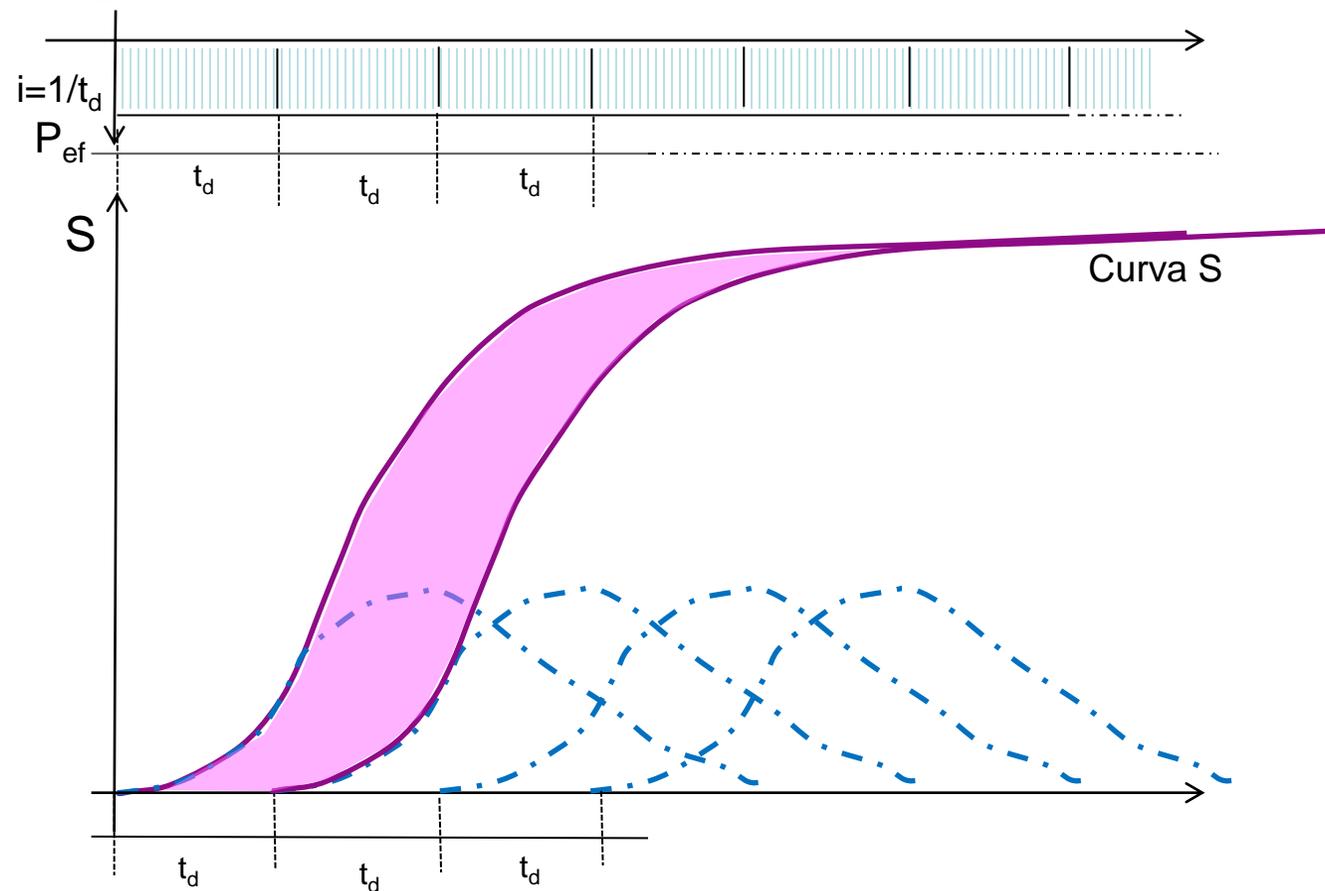
- Admite-se um período posterior de t_d de chuva efetiva (excedente) imediatamente após o anterior, o qual vai gerar um $HU(t_d)$ idêntico ao primeiro, porém deslocado de t_d no tempo para a direita (assim sucessivamente, n vezes até atingir t_d')
- Somando todos os HUs, resulta um hidrograma que representa o escoamento de t_d' , porém com n unidades de chuva excedente.
- Como $HU(t_d)$ possui intensidade de $1/t_d$ unidades (por ser HU deve conter 1 unidade de chuva em todo o seu período), o hidrograma total é o resultado de uma chuva com intensidade n vezes maior à exigida, bastando portanto dividir as ordenadas por n para assim se obter o HU de t_d' horas (Ex. linha tracejada da figura para $n=2$).



Caso 2 (geral): Transformação para qualquer outro t_d' maior, menor, múltiplo ou não múltiplo de t_d

Caso haja uma chuva efetiva de intensidade $1/t_d$ e duração infinita, nos intervalos seguintes tem-se:

Se deslocar a Curva S de t_d e subtrair as ordenadas das duas curvas S obtém-se o HU original, ou seja, $HU(t_d)$

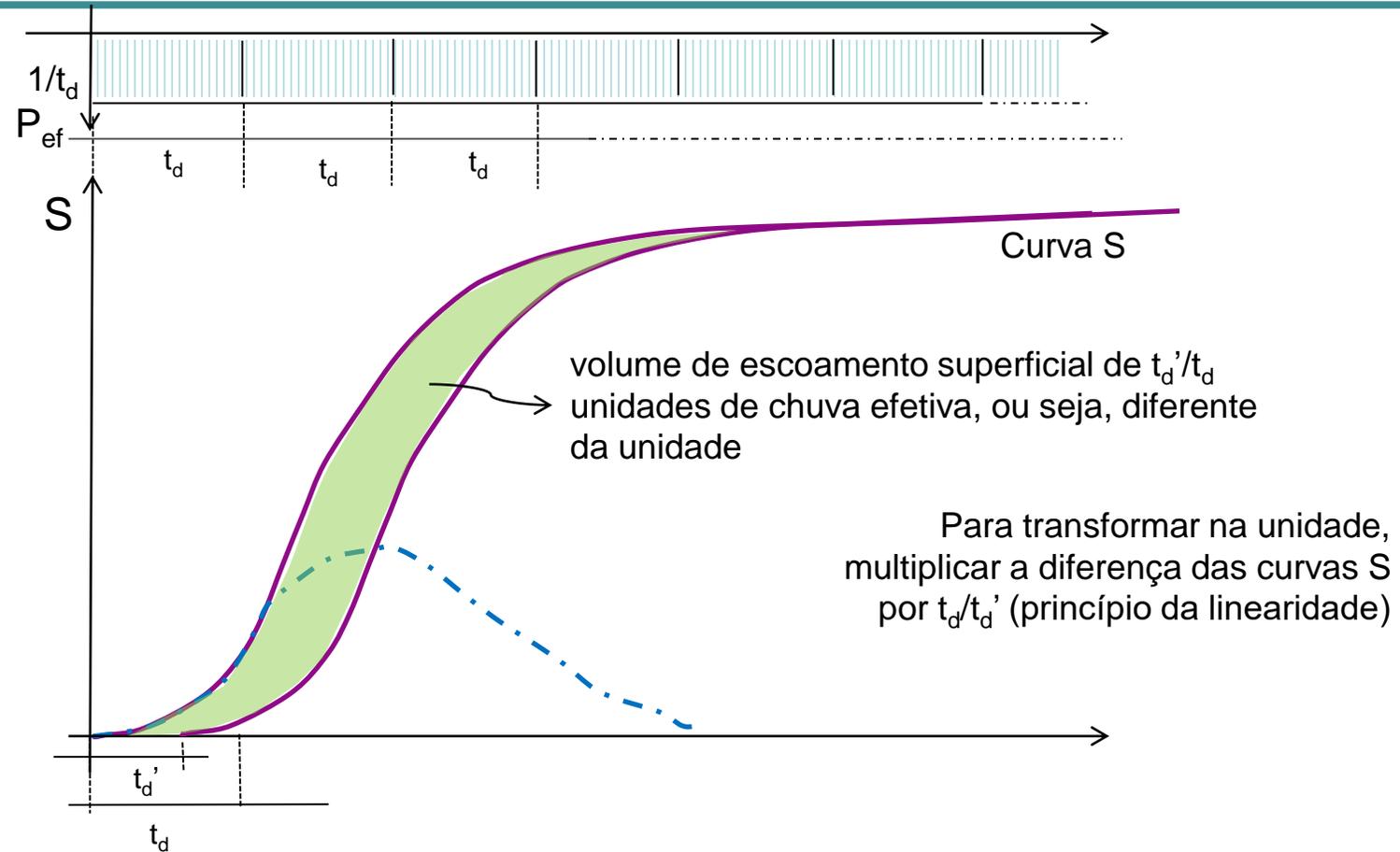


Curva S

											Curva S
Chuva 1	Chuva 2	Chuva 3	Chuva 4	Chuva 5	Chuva 6	Chuva 7	Chuva 8	Chuva 9	Chuva 10	...	Hidrograma resultante
0											0
1	0										1
3	1	0									4
5	3	1	0								9
4	5	3	1	0							13
3	4	5	3	1	0						16
2	3	4	5	3	1	0					18
1	2	3	4	5	3	1	0				19
0	1	2	3	4	5	3	1	0			19
	0	1	2	3	4	5	3	1	0		19
		0	1	2	3	4	5	3	1	...	19
			0	1	2	3	4	5	3	...	19
				0	1	2	3	4	5	...	19
					0	1	2	3	4	...	19
						0	1	2	3	...	19
							0	1	2	...	19
								0	1	...	19
									0	...	19

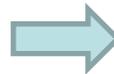
O hidrograma atinge um patamar, e este começa quando o primeiro hidrograma não contribui mais, ou seja, no tempo de concentração (t_c) do hidrograma de intensidade $1/t_d$ e de duração t_d .



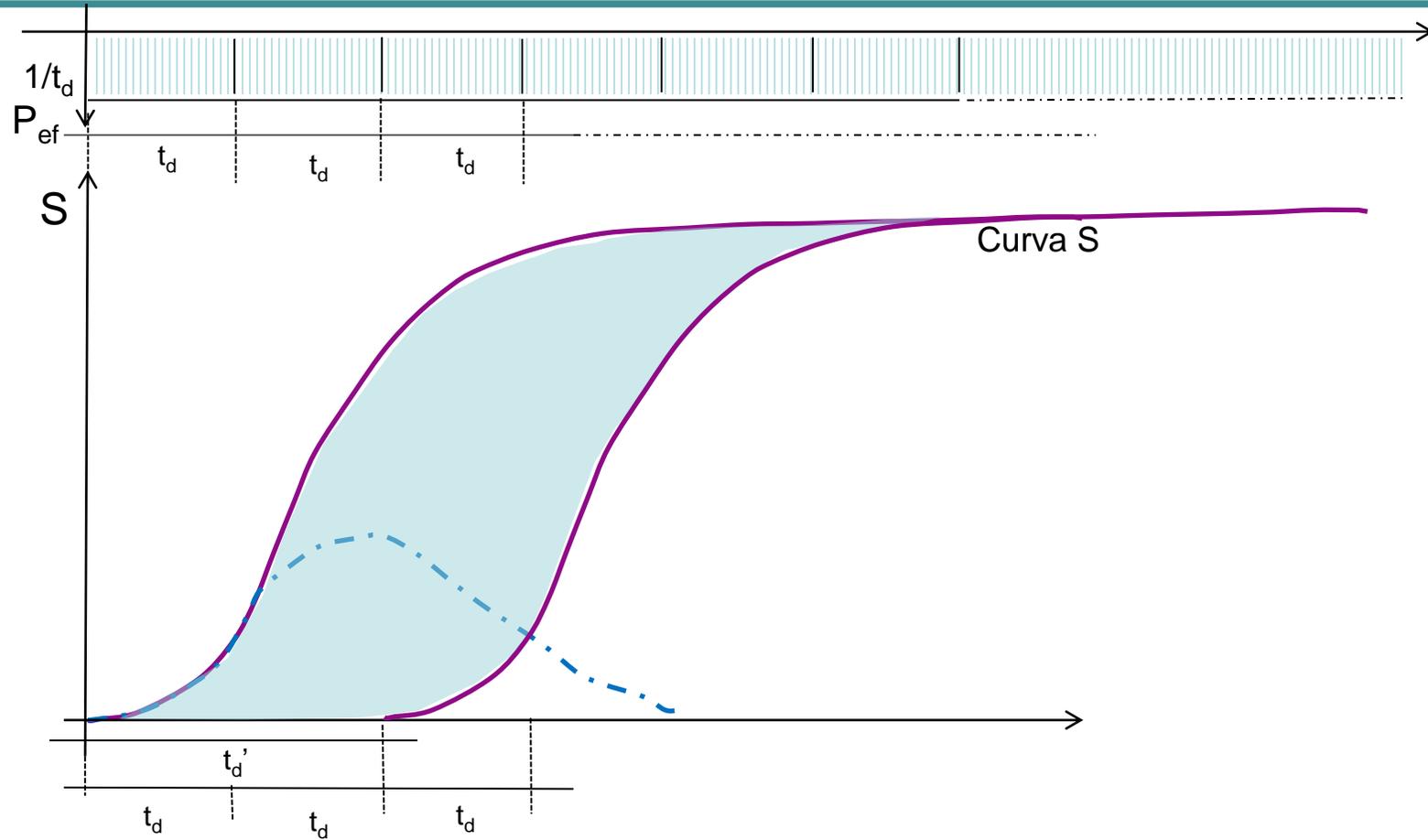


Princípio da linearidade:

$$\begin{array}{l} t_d'/t_d \rightarrow (S_{td} - S_{td'}) \\ 1 \rightarrow HU_{(td')} \end{array}$$



$$HU_{(td')} = (S_{td} - S_{td'}) * (t_d/t_d')$$



Exercício 4

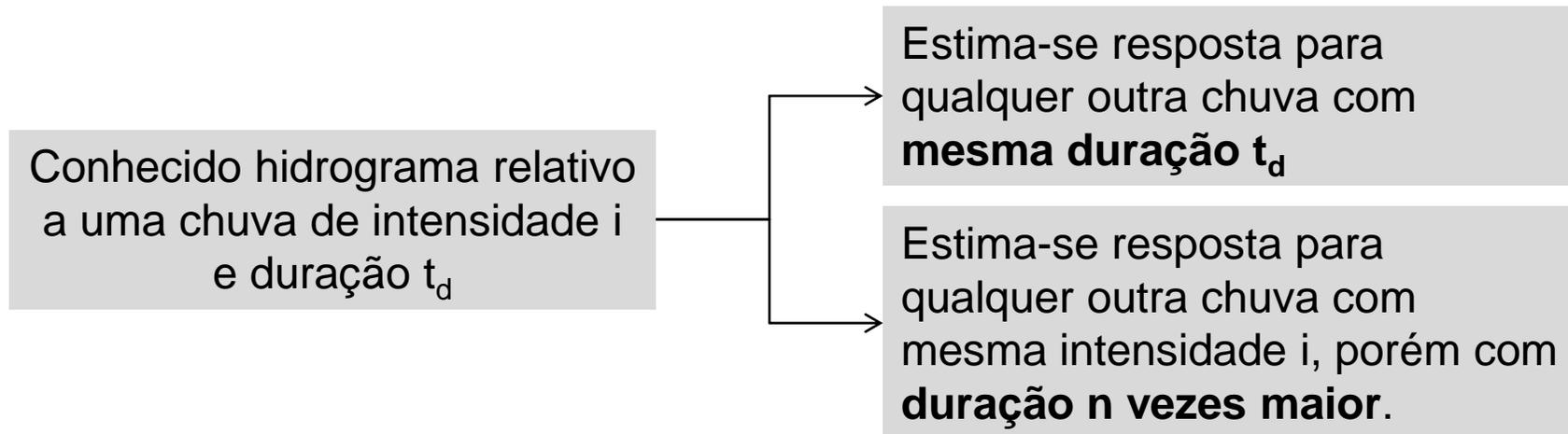
O HU de 0,5 h de duração de uma bacia hidrográfica encontra-se tabelado abaixo. Determinar:

- A curva S de 0,5 h de duração
- O HU de 1,5h de período unitário

T (h)	HU (0,5h) (m ³ /s)
0	0
0,5	4,5
1	12,03
1,5	26,12
2	27,94
2,5	16,28
3	5,05
3,5	4,25
4	3,05
4,5	1,93

Considerações finais

- HU é uma **constante da bacia**, refletindo suas propriedades com relação ao escoamento superficial.
- Considera a bacia linear e invariante no tempo.
- As diversas características físicas da bacia devem, em maior ou menor grau, influenciar as condições de escoamento e contribuir para a forma final do HU
- O conhecimento de dados de chuva e vazão permite que se defina o hidrograma unitário da bacia. Conhecido o HU e a “chuva de projeto” pode-se prever a vazão na exutória.



13.B - Hidrograma Unitário Sintético

13

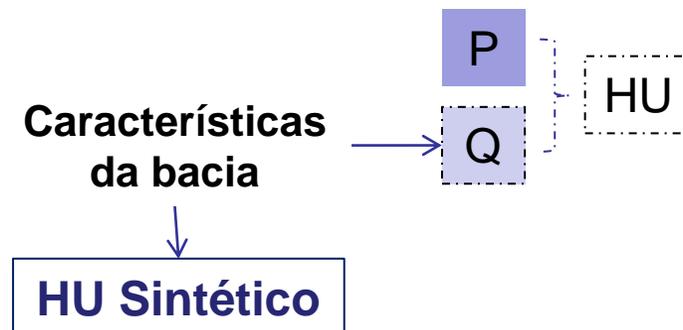
Objetivo: Vazão de projeto

INEXISTÊNCIA DE DADOS

(P e Q) para construção do HU da bacia

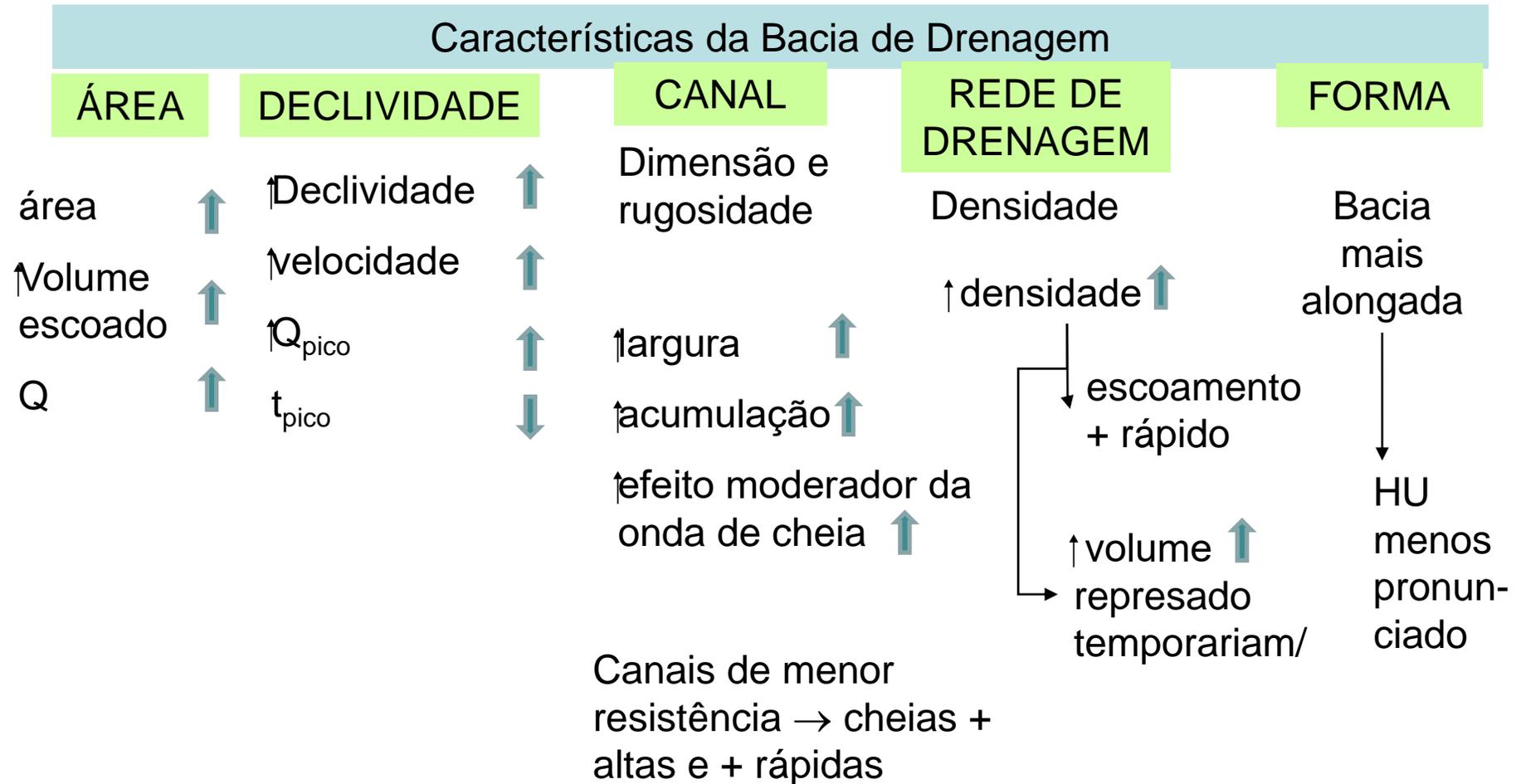
A forma final do HU é influenciada pelas características físicas da bacia

Estabelecer **HU sintético**
(HU aproximado)



Influências no hidrograma

13



Métodos para obter HU sintético

Número de métodos existentes é muito grande, citam-se:

- Método de Snyder → Mais conhecido
- Método sintético triangular ou SCS
- Método de Commons → Mais simples, mas Q deve ser conhecida
- Método de Getty e Mctughs → Complementação do Método de Commons
- Espey
- Clark
- etc

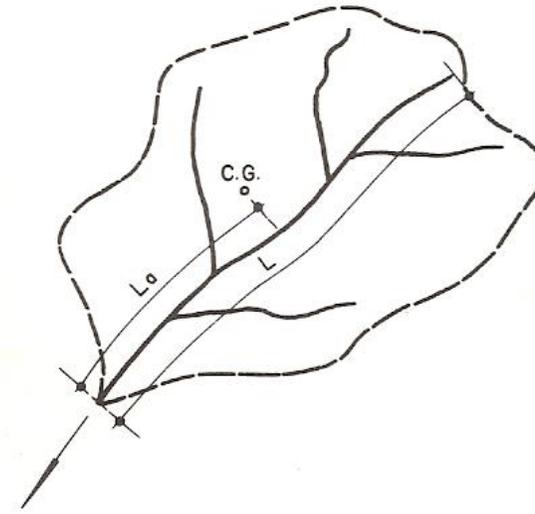
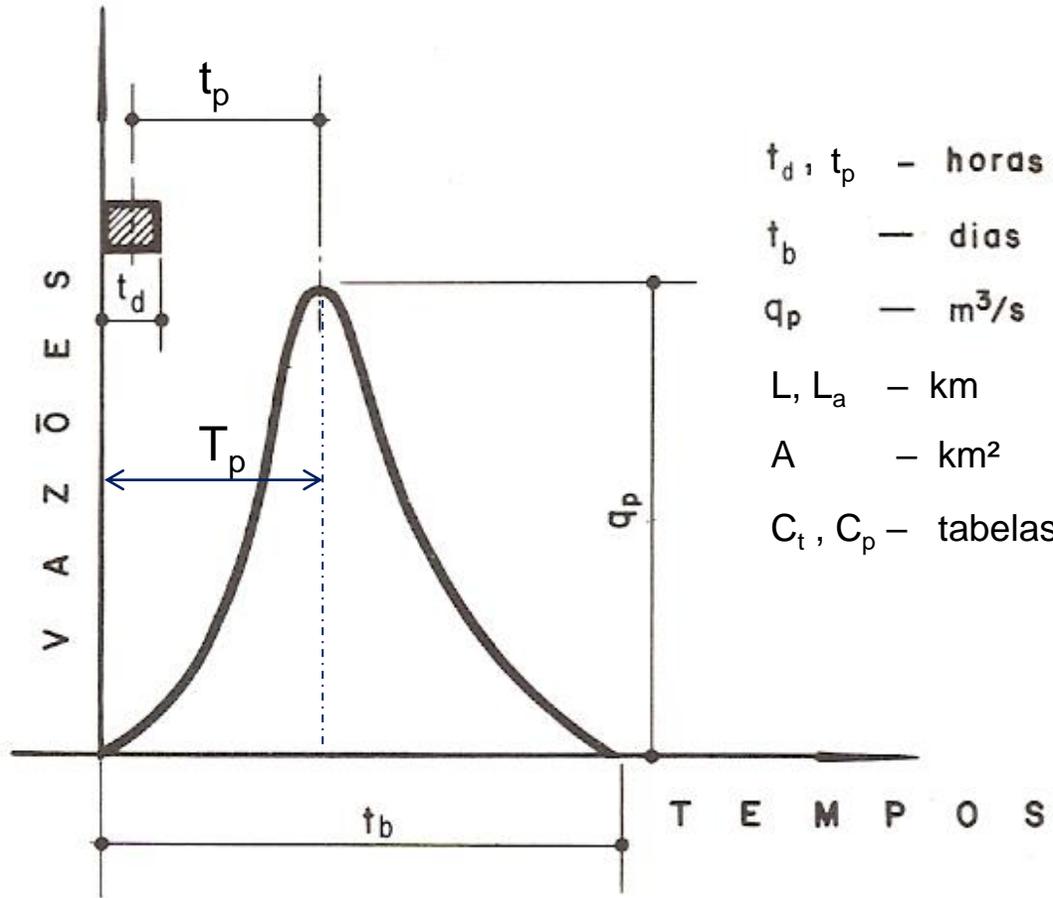
13.B.1 - Método de Snyder (1938)

13

- Método de correlação
- Estudo de várias bacias, região montanhosa dos Apalaches, EUA
- Linsley & Franzini comprovaram que a equação de Snyder pode ser utilizada em outros locais, desde que com as devidas modificações dos parâmetros.

Método de Snyder (1938)

13



Relação entre t_p e T_p

Da figura:

$$t_p = T_p - \frac{t_d}{2}$$

$$t_p = \frac{C_t(L \times L_a)^{0,3}}{1,33}$$

$$t_d = \frac{t_p}{5,5}$$

$$t_d = \frac{t_p}{5,5}$$

$$T_p = 6t_d$$

$$T_p = 1,09t_p$$

$$q_p = \frac{2,76C_pA}{t_p}$$

Tempo de retardamento do pico (t_p)

Tempo de pico (T_p)

Duração da chuva (t_d)

Valores de C_t e C_p

Taxa de impermeabilização	C_t	C_p
60%	0,25	0,45
40%	0,30	0,50
20%	0,35	0,55

- Subtrair 0,1 em áreas com poucas galerias
- Somar 0,1 em áreas completamente canalizadas
- Subtrair 0,1 em áreas muito planas
- Somar 0,1 em bacias de alta declividade

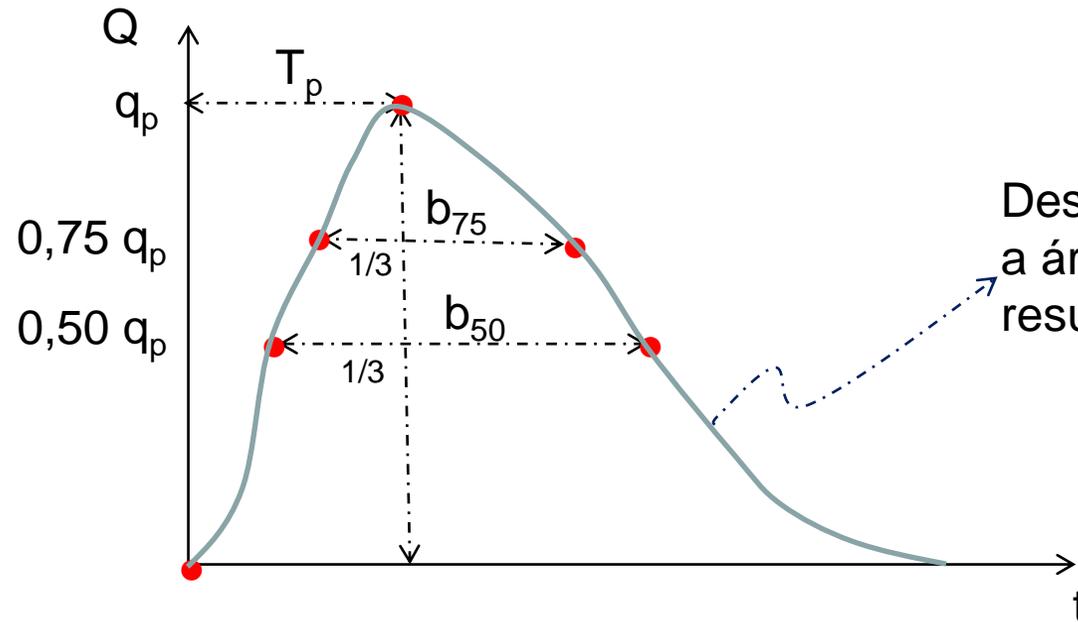
Desenho do HU (t_d)

$$b_{75} = 1,25q_p^{-1,12}$$

$$b_{50} = 2,20q_p^{-1,12}$$

(em horas)

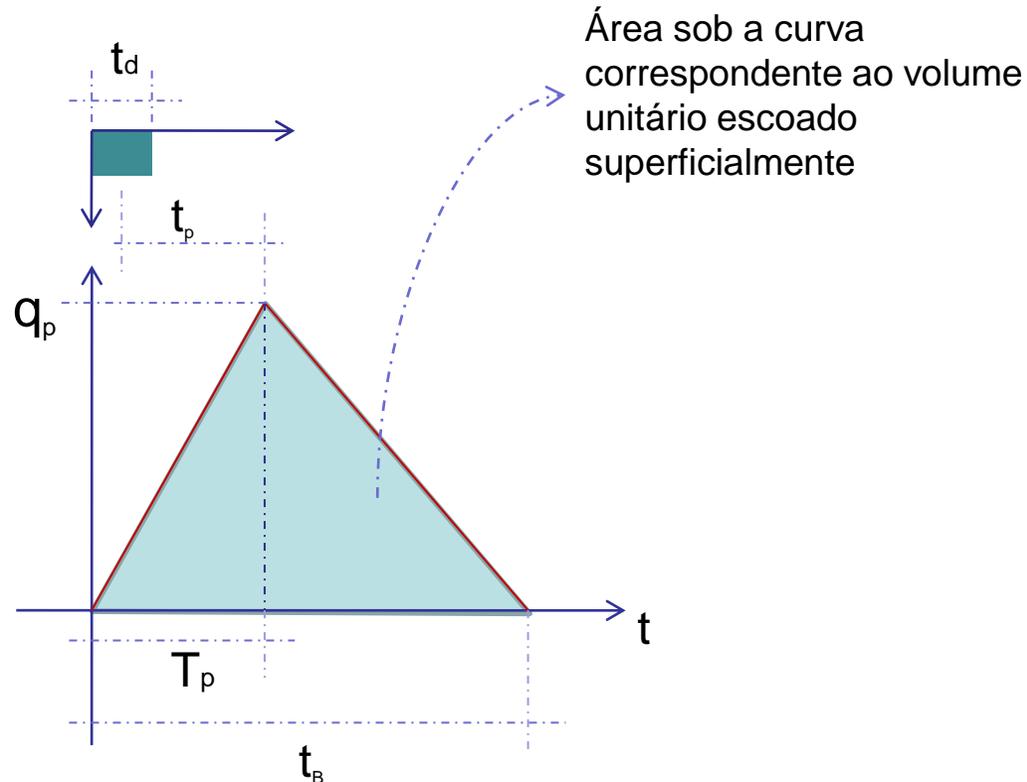
1/3 antes do pico



Desenhar de tal forma que a área abaixo da curva resulte em $P_{ef} = 1 \text{ cm}$

13.B.2 - HU sintético triangular - SCS

Muito usado para pequenas bacias.
Simplificação do hidrograma: forma triangular



q_p : vazão unitária de pico t_d : tempo de duração da chuva unitária efetiva
 T_p : Tempo de pico t_p : tempo de retardamento t_B : Tempo de base

$$t_B = 2,67T_p$$

$$t_B - t_d = t_c$$

$$q_p = \frac{2,08A}{T_p}$$

q_p - m³/s
 A - km²
 T_p - horas

$$T_p \geq 3t_d$$

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad \text{Kirpich}$$

t_c : Tempo de concentração (min)
 L : Extensão do talvegue (km)
 H : Diferença de nível entre o ponto mais afastado e o ponto considerado (m)

Exercício 5

13

Uma bacia hidrográfica de 40 km^2 tem o comprimento do talvegue de 12 km e declividade média de $0,005$. Determinar o HU sintético triangular (SCS). Adotar a duração da chuva igual a $0,5\text{h}$.

Exercício 5 - solução

Uma bacia hidrográfica de 40 km² tem o comprimento do talvegue de 12 km e declividade média de 0,005. Determinar o HU sintético triangular (SCS). Adotar a duração da chuva igual a 0,5h.

a) Calcular o t_c :

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

t_c : Tempo de concentração (min)
L: Extensão do talvegue (km)
H: Diferença de nível entre o ponto mais afastado e o ponto considerado (m)

Declividade = H/L

$$t_c = 207,8 \text{ min} = 3,5\text{h}$$

b) Calcular o t_B :

$$t_B - t_d = t_c$$

$$t_B = 3,5 + 0,5 = 4,0\text{h}$$

c) Calcular o T_p :

$$t_B = 2,67T_p$$

$$T_p = 1,5\text{h}$$

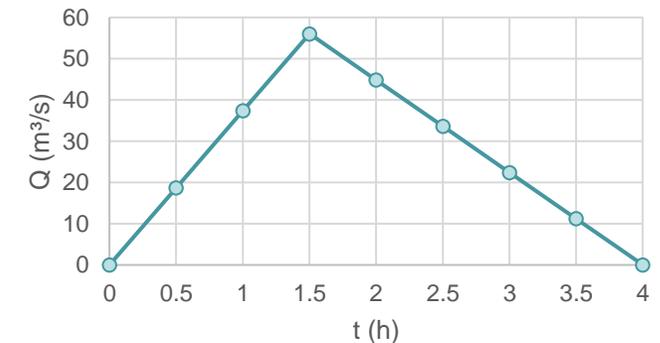
d) Calcular o q_p :

$$q_p = \frac{2,08A}{T_p}$$

q_p - m³/s
A - km²
 T_p - horas

$$q_p = 56,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

HU (0,5h)



t (h)	HU (0,5h) m³/s
0	0
0.5	18.7
1	37.4
1.5	56.0
2	44.8
2.5	33.6
3	22.4
3.5	11.2
4	0