

Águas superficiais

Hidrógrafa e separação de fluxo de base

TEA018 - Hidrologia Ambiental

Prof. Emílio G. F. Mercuri, Maio de 2023

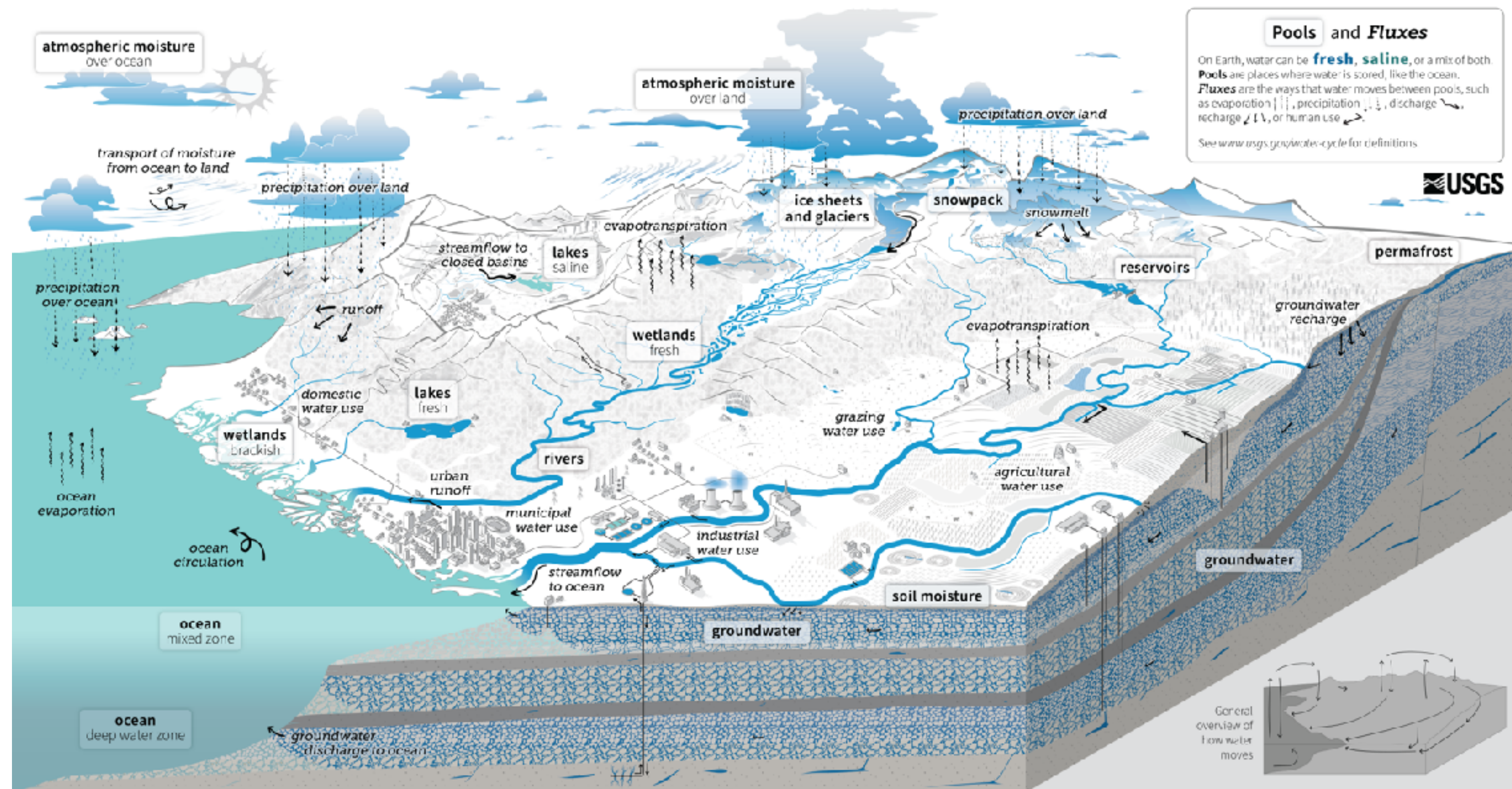
Agenda

Águas superficiais

- Tipos de escoamento na escala da vertente
- Hidrógrafa
- Separação do Fluxo de Base
 - 4 Métodos
- Exercícios em sala e para casa

Runoff and Streamflow

Runoff = escoamento, ou seja é um termo genérico em hidrologia.



The Water Cycle

The water cycle describes where water is on Earth and how it moves. Water is stored in the atmosphere, on the land surface, and below the ground. It can be a liquid, a solid, or a gas. Liquid water can be fresh, saline (salty), or a mix (brackish). Water moves between the places it is stored. Water moves at large scales and at very small scales. Water moves naturally and because of human actions. Human water use affects where water is stored, how it moves, and how clean it is.

Pools store water. 96% of all water is stored in **oceans** and is saline. On land, saline water is stored in **saline lakes**. Fresh water is stored in liquid form in **freshwater lakes**, artificial **reservoirs**, **rivers**, and **wetlands**. Water is stored in solid, frozen form in **ice sheets** and **glaciers**, and in **snowpack** at high elevations or near the earth's poles. Water vapor is a gas and is stored as **atmospheric moisture** over the ocean and land. In the soil, frozen water is stored as **permafrost** and liquid water is stored as **soil moisture**. Deeper below ground, liquid water is stored as **groundwater** in aquifers, within cracks and pores in the rock.

Fluxes move water between pools. As it moves, water can change form between liquid, solid, and gas. **Circulation** mixes water in the oceans and transports water vapor in the atmosphere. Water moves between the atmosphere and the surface through **evaporation**, **evapotranspiration**, and **precipitation**. Water moves across the surface through **snowmelt**, **runoff**, and **streamflow**. Water moves into the ground through infiltration and **groundwater recharge**. Underground, groundwater flows within aquifers. It can return to the surface through natural **groundwater discharge** into rivers, the ocean, and from **springs**.

We alter the water cycle. We redirect rivers. We build dams to store water. We drain water from wetlands for development. We use water from rivers, lakes, reservoirs, and groundwater aquifers. We use that water to supply our **homes and communities**. We use it for **agricultural** irrigation and **grazing** livestock. We use it in **industrial** activities like thermoelectric power generation, mining, and aquaculture. The amount of water that is available depends on how much water is in each pool (water quantity). It also depends on when and how fast water moves (water timing), how much water we use (water use), and how clean the water is (water quality).

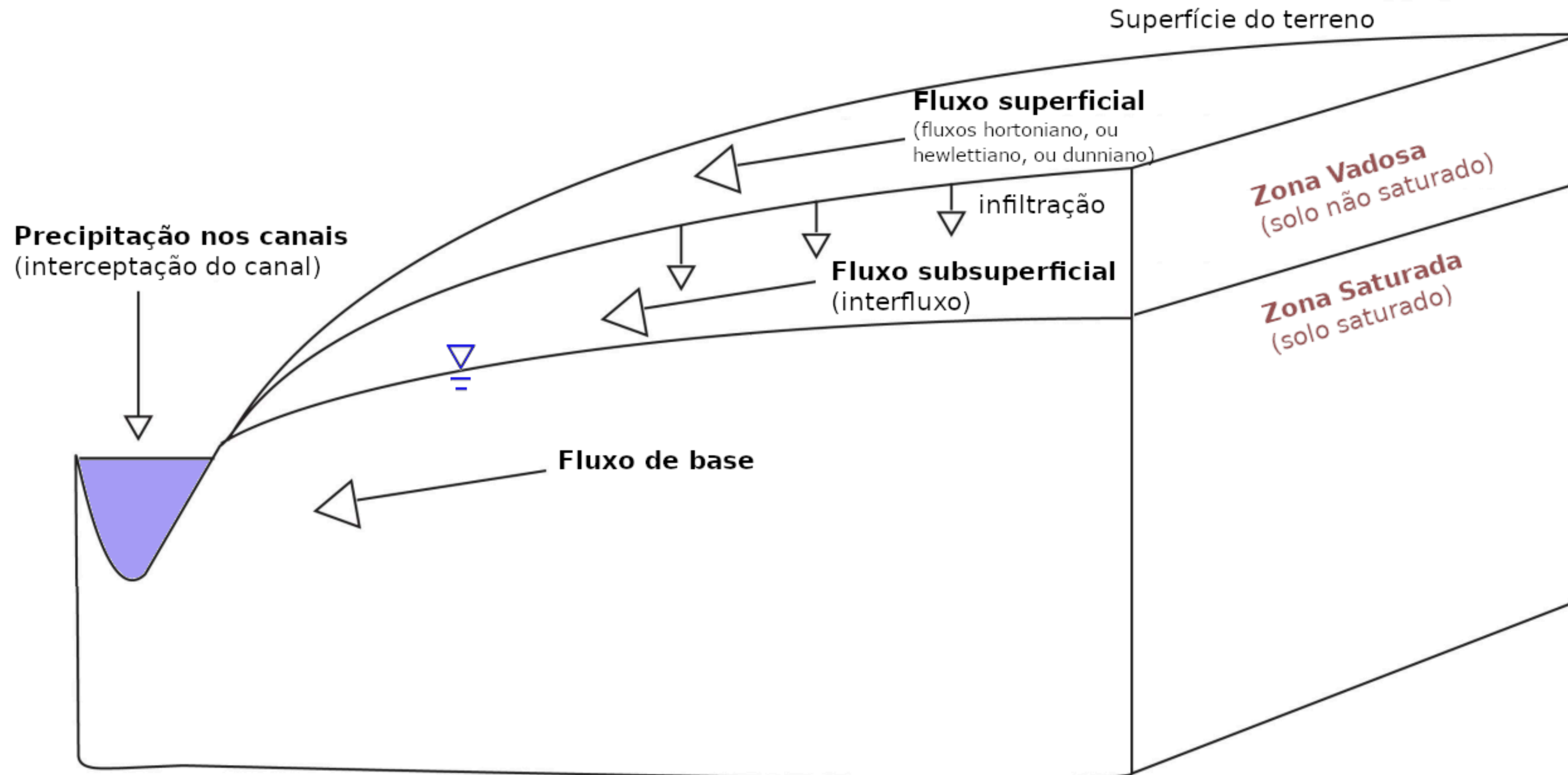
We affect **water quality**. In agricultural and urban areas, irrigation and precipitation wash fertilizers and pesticides into rivers and groundwater. Power plants and factories return heated and contaminated water to rivers. Runoff carries chemicals, sediment, and sewage into rivers and lakes. Downstream from these sources, contaminated water can cause harmful algal blooms, spread diseases, and harm habitats. **Climate change** is affecting the water cycle. It is affecting water quality, quantity, timing, and use. It is causing ocean acidification, sea level rise, and more extreme weather. By understanding these impacts, we can work toward using water sustainably.

Runoff is the flow of **water** across the earth, and is a major component in the **hydrological cycle**. Runoff that flows over land before reaching a watercourse is referred to as **surface runoff** or **overland flow**. Once in a **watercourse**, runoff is referred to as **streamflow**, **channel runoff**, or **river runoff**. **Urban runoff** is surface runoff created by **urbanization**.

Águas superficiais

Tipos de escoamento na escala da vertente

- Entrada de água nos canais ou rios:



Fluxo superficial

Tipos de fluxo superficial

Vários conceitos têm sido usados para descrever a geração de escoamento.

- **Horton (1933)** estabeleceu que o escoamento ocorre quando a intensidade da precipitação excede a taxa de infiltração de água no solo.
- **Hewlett e Hibbert (1967)** aprimoraram essa ideia ao incluir a umidade do solo como uma variável, pois o fluxo Hortoniano não leva em consideração o teor de água do solo antes da precipitação. Essa nova compreensão do escoamento é conhecida como fluxo Hewlettiano.
- **Dunne (1978)** refinou o conceito de geração de fluxo Hewlettiano, estabelecendo assim o fluxo de superfície Dunniano, que é gerado devido à saturação do solo superficial. Isso geralmente ocorre em áreas próximas a córregos, que evoluem com o tempo.



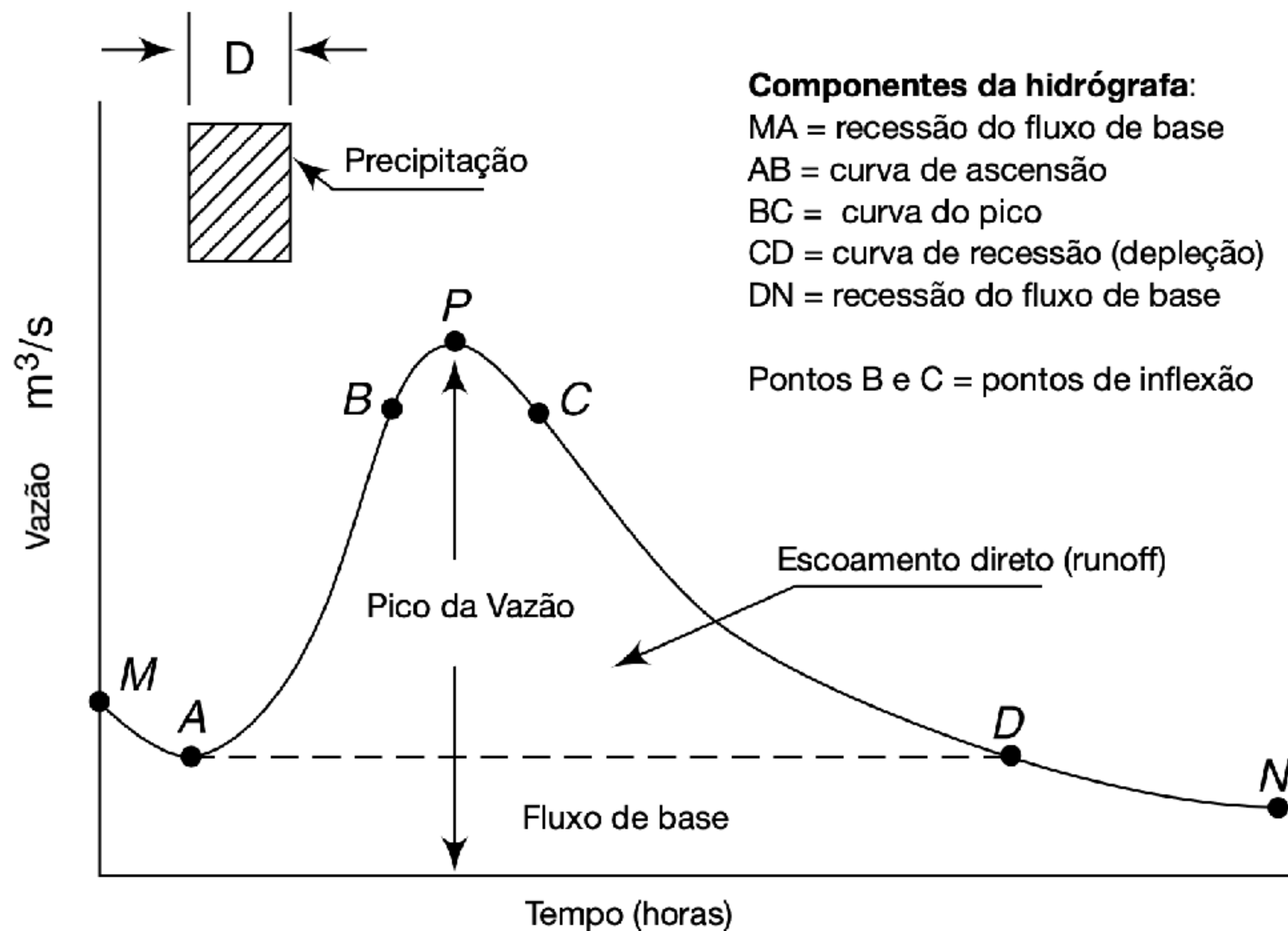
Fluxo Hortoniano

Saturação da superfície,
que pode levar ao fluxo Dunniano.



Hidrógrafa

Elementos da hidrógrafa



Uma aproximação conhecida é:

$$S(t) = kQ(t)$$

O armazenamento S é função da vazão Q

$$\frac{dS}{dt} = P - Q - ET$$

é razoável assumirmos para pequenos Δt

$Q \gg ET$ e $P = 0$:

$$\frac{dS}{dt} = -Q$$

Substituindo a aproximação:

$$k \frac{dQ}{dt} = -Q \rightarrow \frac{dQ}{Q} = -\frac{1}{k} dt$$

$$\ln Q \Big|_{Q_0}^{Q(t)} = -\frac{1}{k} \tau \Big|_{t_0}^t \rightarrow \ln \frac{Q(t)}{Q_0} = -\frac{1}{k} (t - t_0)$$

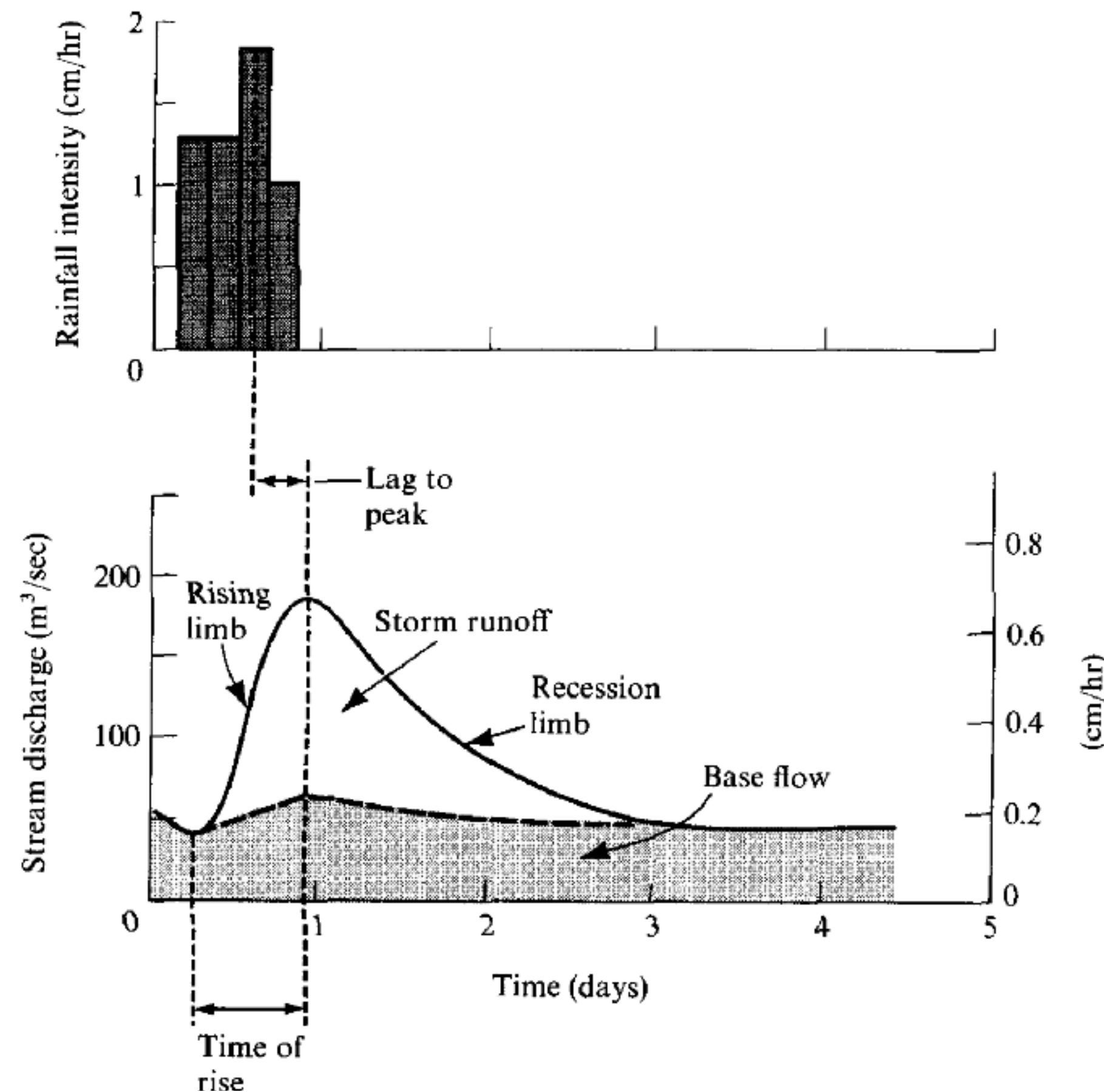
A Curva de Recessão tem decaimento exponencial:

$$Q(t) = Q_0 e^{-(t-t_0)/k}$$

- Q_0 é a vazão no tempo t_0
- k = constante de decaimento exponencial

Streamflow and runoff

Escoamento nos rios/canais



Terminologia

Streamflow (runoff) =
storm runoff + baseflow

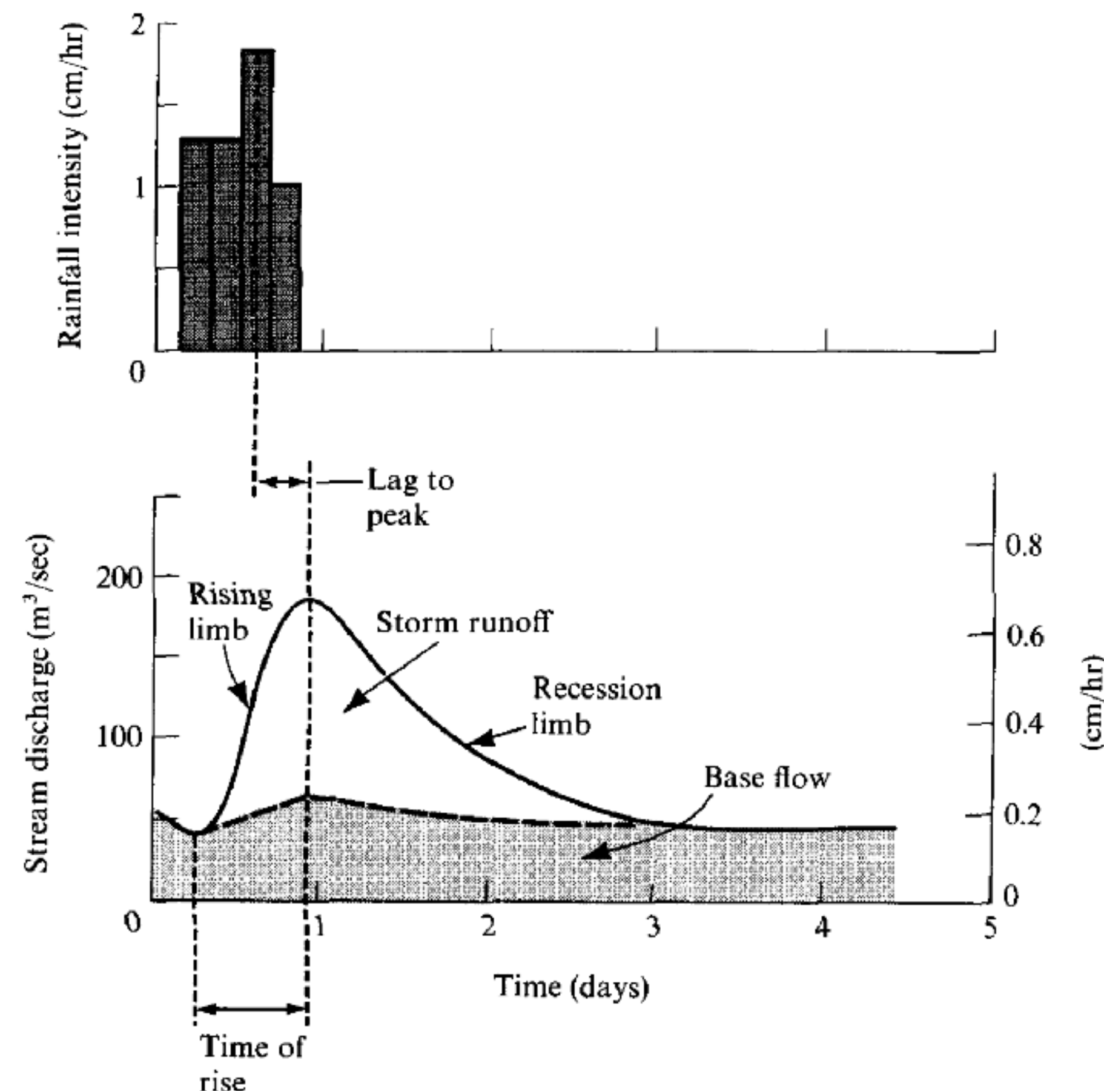
ou

quickflow + delayed flow

Runoff is the flow of [water](#) across the earth, and is a major component in the [hydrological cycle](#). Runoff that flows over land before reaching a watercourse is referred to as [surface runoff](#) or *overland flow*. Once in a [watercourse](#), runoff is referred to as [streamflow](#), *channel runoff*, or *river runoff*. [Urban runoff](#) is surface runoff created by [urbanization](#).

Separação do Fluxo de base

Escoamento nos rios/canais



A vazão total Q_t é composta por:

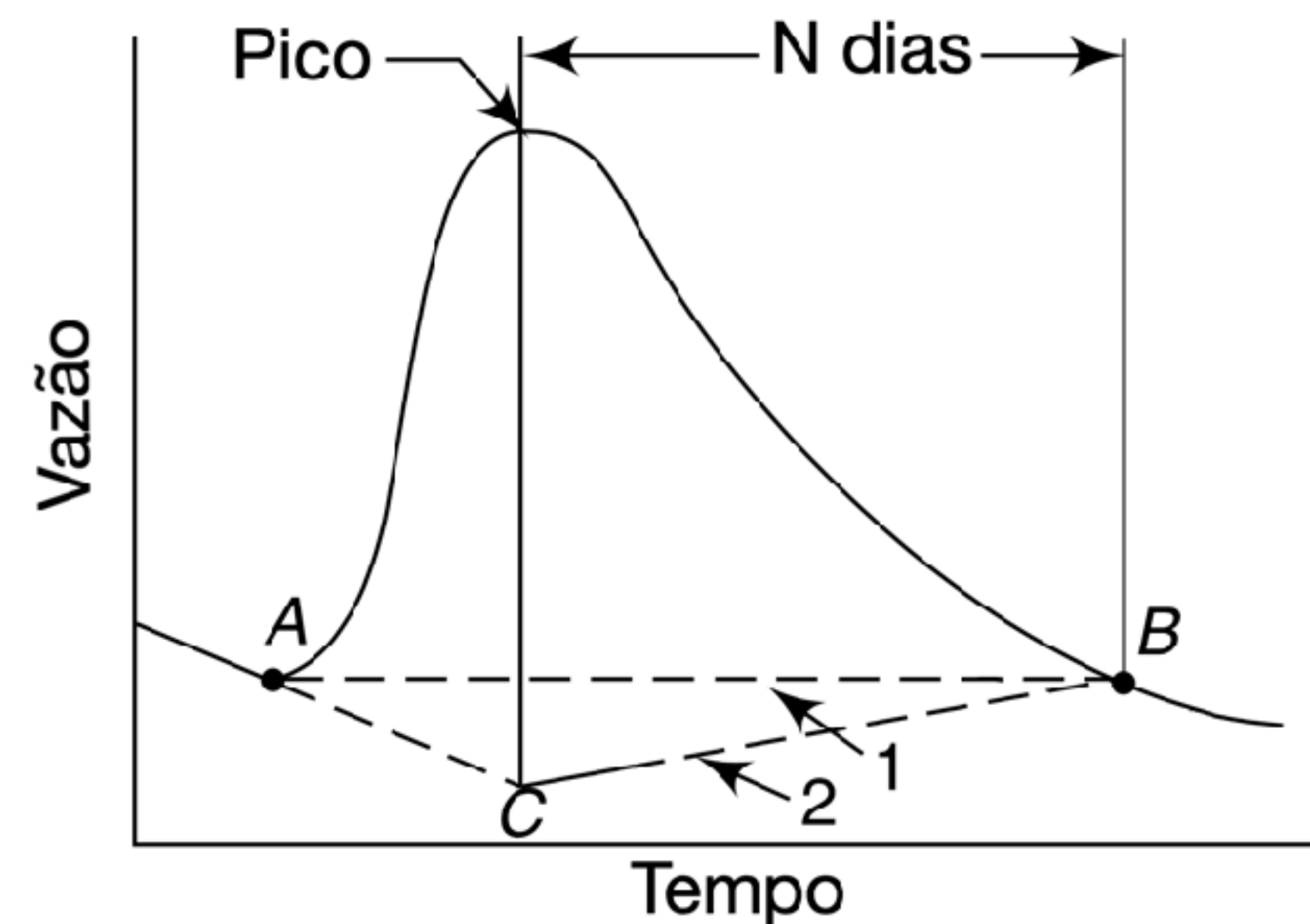
- escoamento superficial (A_t)
- fluxo de base (B_t)

$$Q_t = A_t + B_t$$

Separação do Fluxo de Base

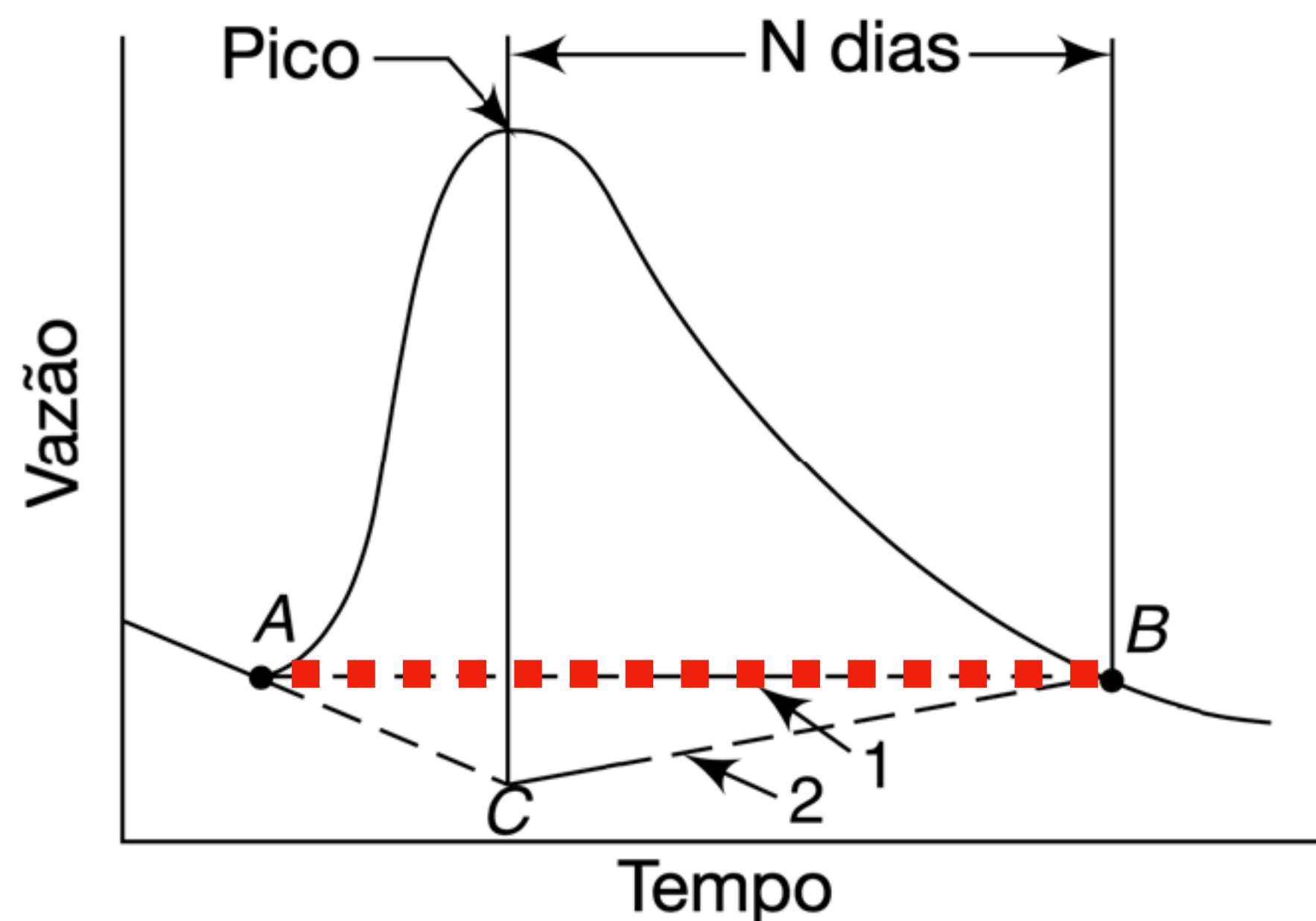
Métodos Empíricos

- Método 1 - Método da Linha reta
- Método 2 - Método Bilinear
- Método 3 - Método de Hewlet e Hibbert (1967)



Separação do Fluxo de Base

Método 1 - Método da Linha Reta

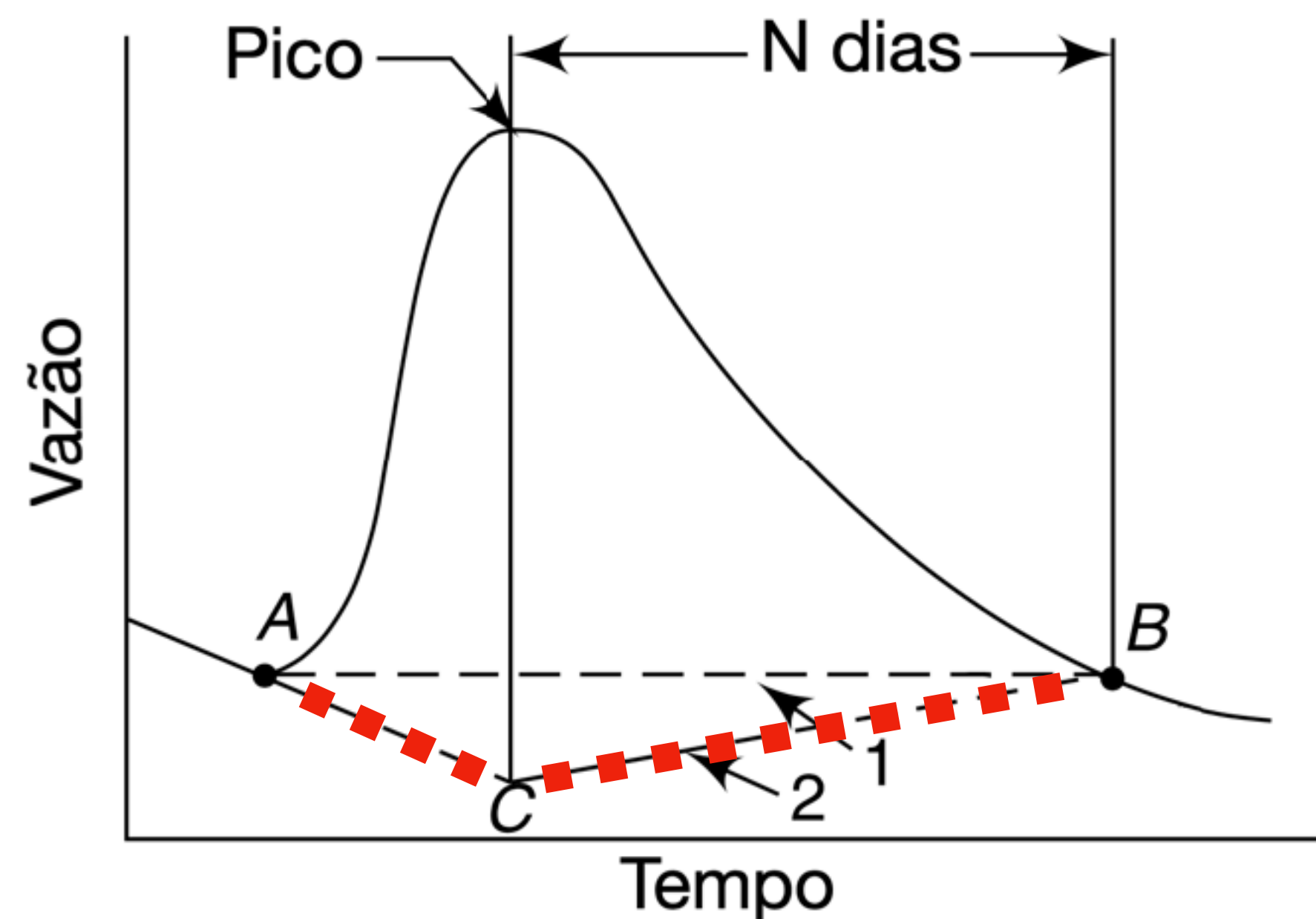


- Traçamos uma linha reta o início do escoamento superficial a um ponto no ramo de recessão que representa o final do escoamento direto.
- **Ponto A:** representa o início do escoamento direto.
- **Ponto B,** marca o fim do escoamento direto.
- Equação descrita por Subramanya (2013):
$$N = 0,83A^{0,2}$$

N (dias) = Intervalo de tempo do pico ao ponto B
 A a área de drenagem em km^2

Separação do Fluxo de Base

Método 2 - Método Bilinear



Traçamos duas retas: A-C e C-B

- **Ponto A:** representa o início do escoamento direto.
- **Ponto B,** marca o fim do escoamento direto.
- **Ponto C,** vazão de base mínima (extensão da curva de recessão, continuação do ponto A)

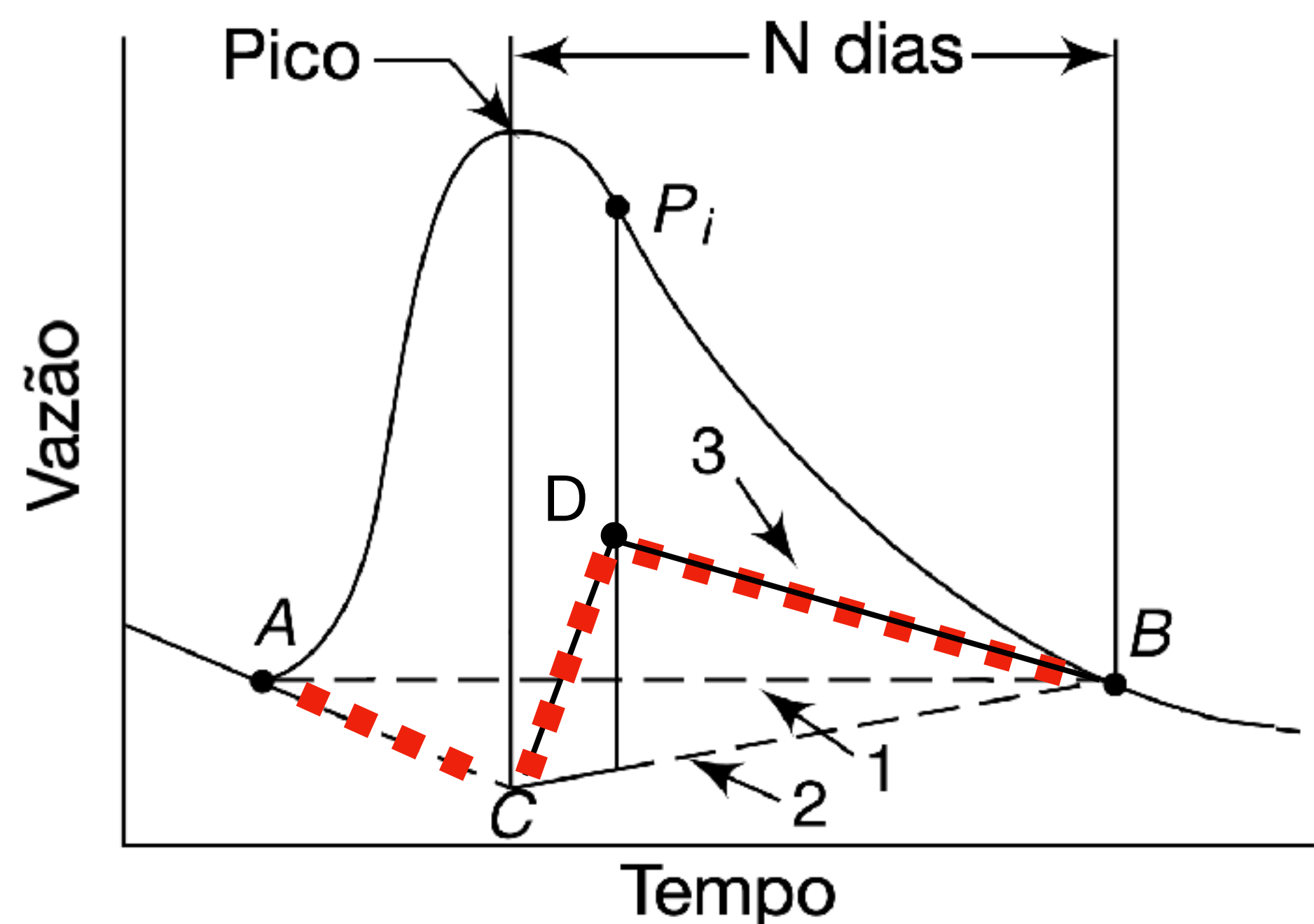
Separação do Fluxo de Base

Método 3 - Variable Slope Method

Traçamos três retas: A-C, C-D e D-B

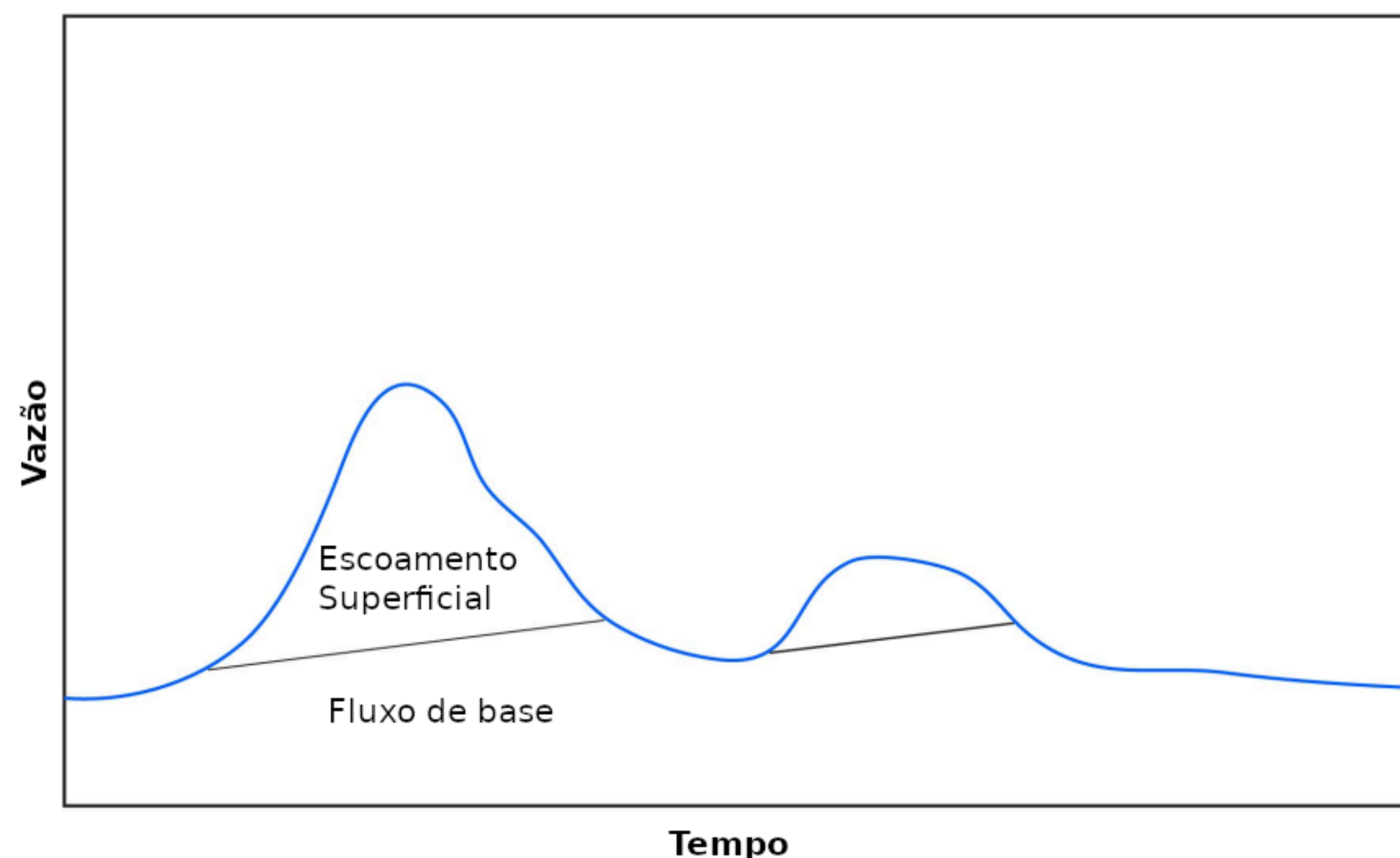
- **Ponto A:** representa o início do escoamento direto. (Ponto de mínimo)
- **Ponto B,** marca o fim do escoamento direto.
- **Ponto C,** vazão de base mínima
- **Ponto P_i :** Ponto de inflexão
- **Ponto D:** união da extrapolação a partir de B com a vertical a partir do ponto de inflexão

A reta DB é a extrapolação da recessão após ponto B.



Separação do Fluxo de Base

Método 4 - Método de Hewlett e Hibbert (1967)



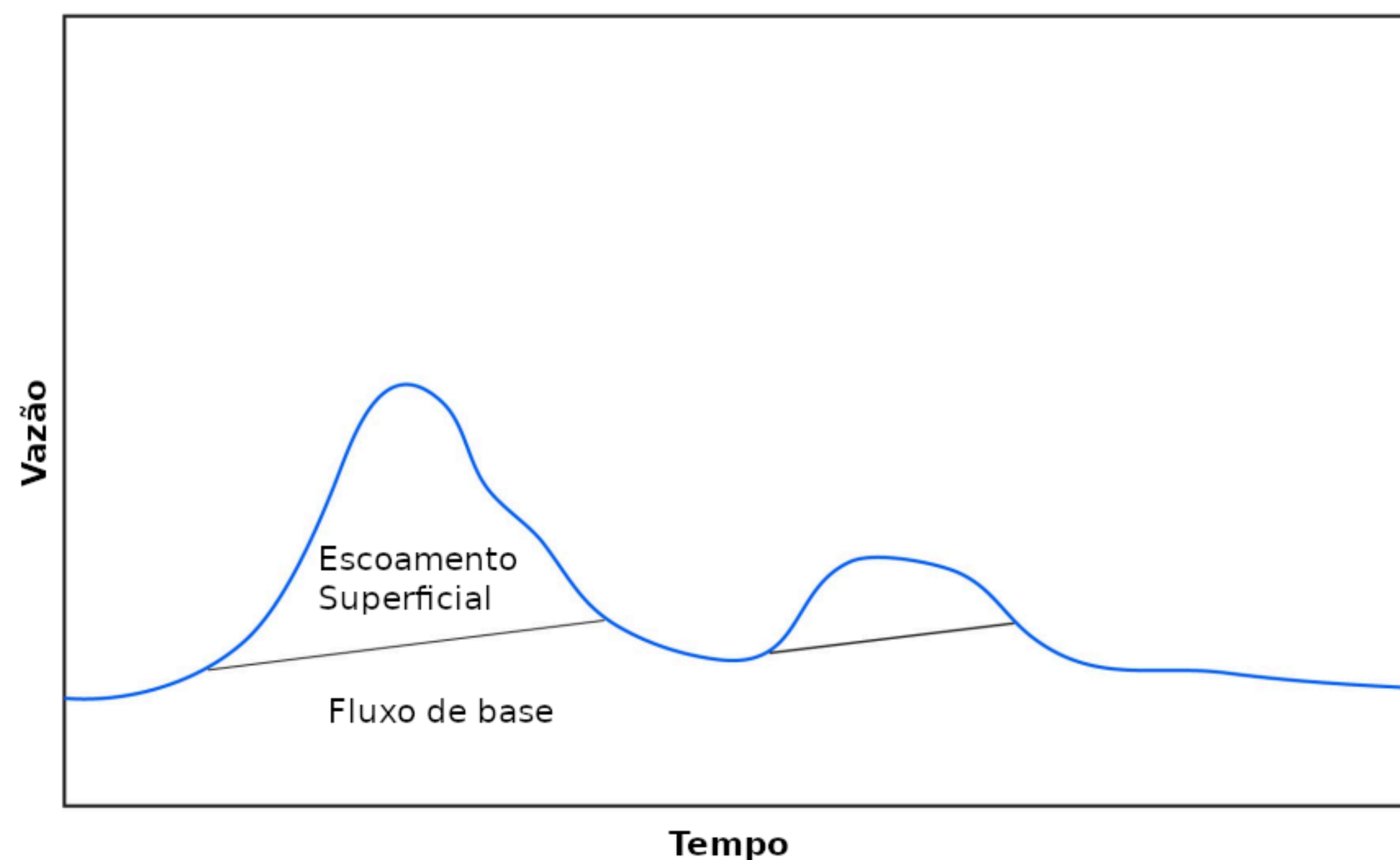
Hewlett e Hibbert (1967) que argumentaram que

“uma vez que uma separação arbitrária deve ser feita em qualquer caso, por que não basear a classificação em uma única decisão arbitrária, como um método fixo e universal? para separar hidrogramas em todas as pequenas bacias?”

Eles separaram o hidrograma em componentes de “fluxo rápido” e “fluxo lento”, projetando arbitrariamente uma linha de inclinação constante desde o início de qualquer aumento de vazão até cruzar a curva de recessão do hidrograma.

Separação do Fluxo de Base

Método 4 - Método de Hewlet e Hibbert (1967)



O aumento constante da vazão é dado por:

$$B_t = B_{t-1} + k \Delta t A \text{ para } Q_t > B_{t-1} + k,$$

$$B_t = Q_t \text{ para } Q_t \leq B_{t-1} + k \Delta t A .$$

Sendo que k determina a inclinação da reta

$$(k = 0,000546 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ h}^{-1})$$

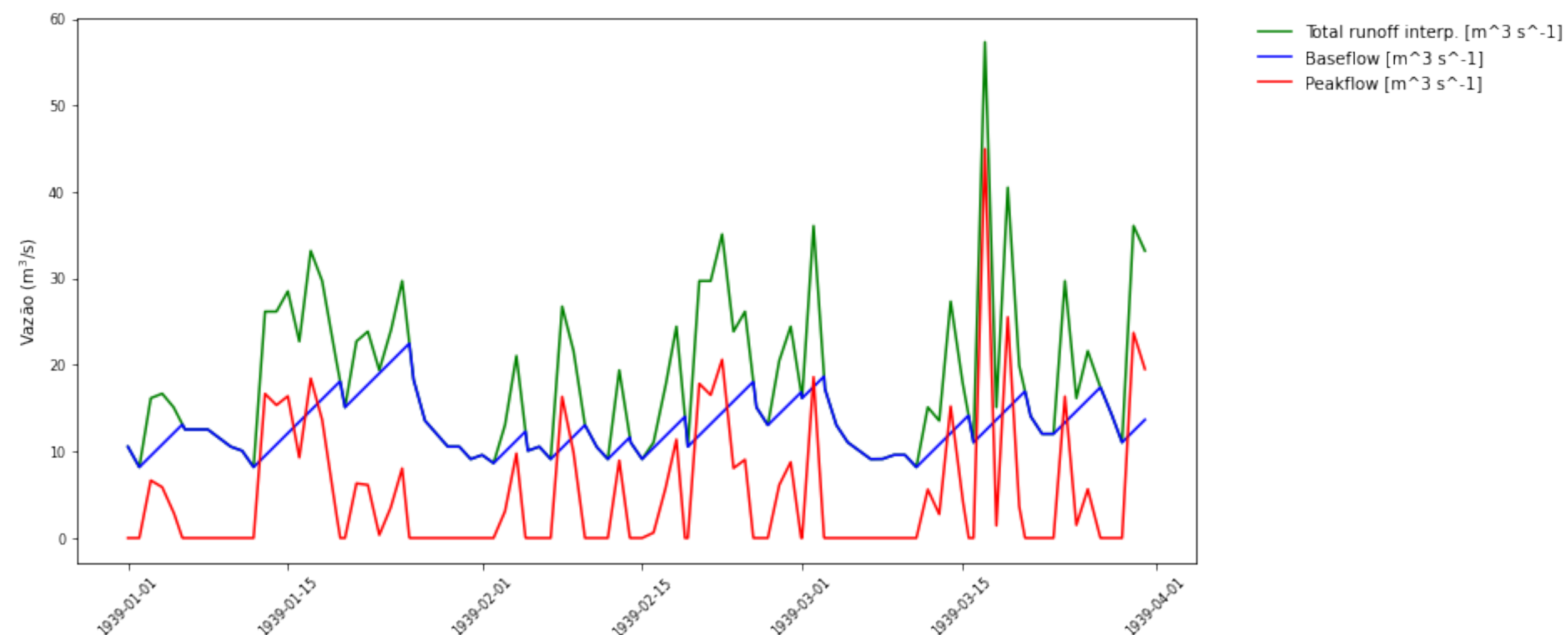
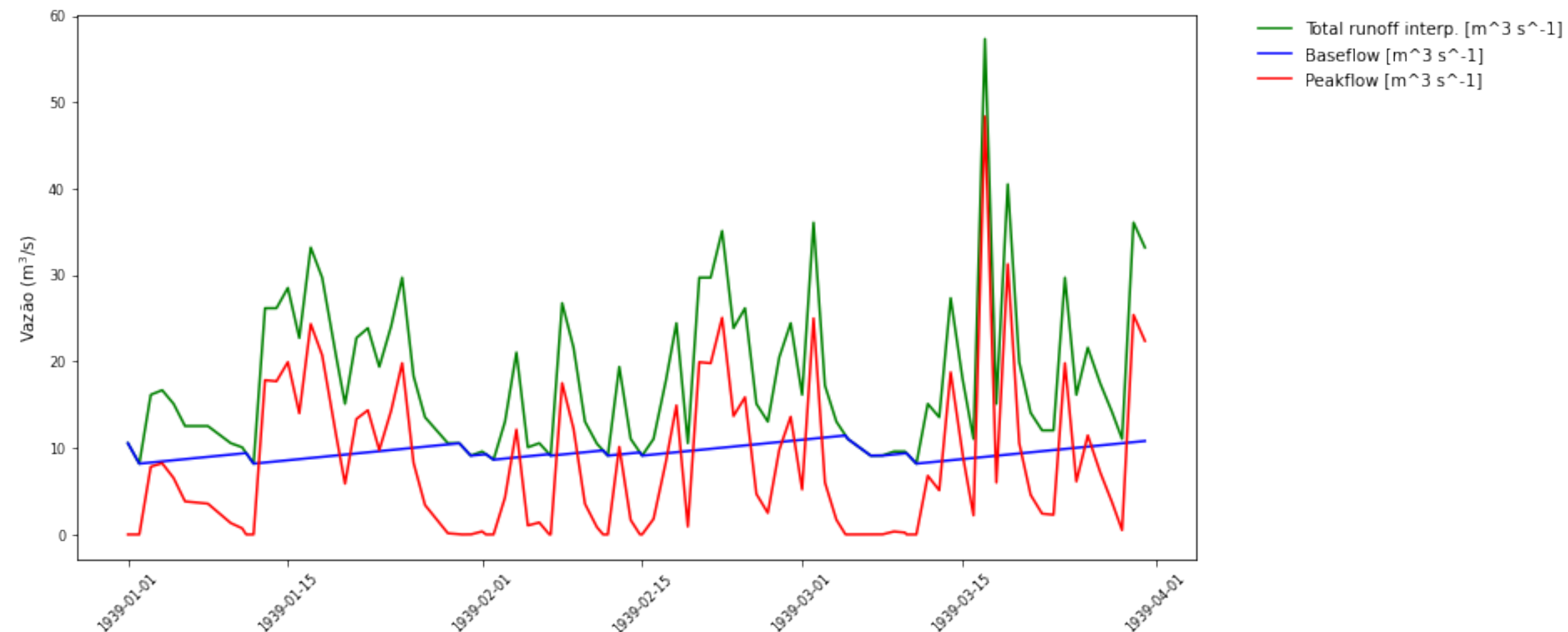
ponderada pela área da bacia em km^2 e

pelo intervalo de tempo Δt em horas

(Hewlet e Hibbert, 1967).

Separação do Fluxo de Base

Método 4 - Método de Hewlet e Hibbert (1967)

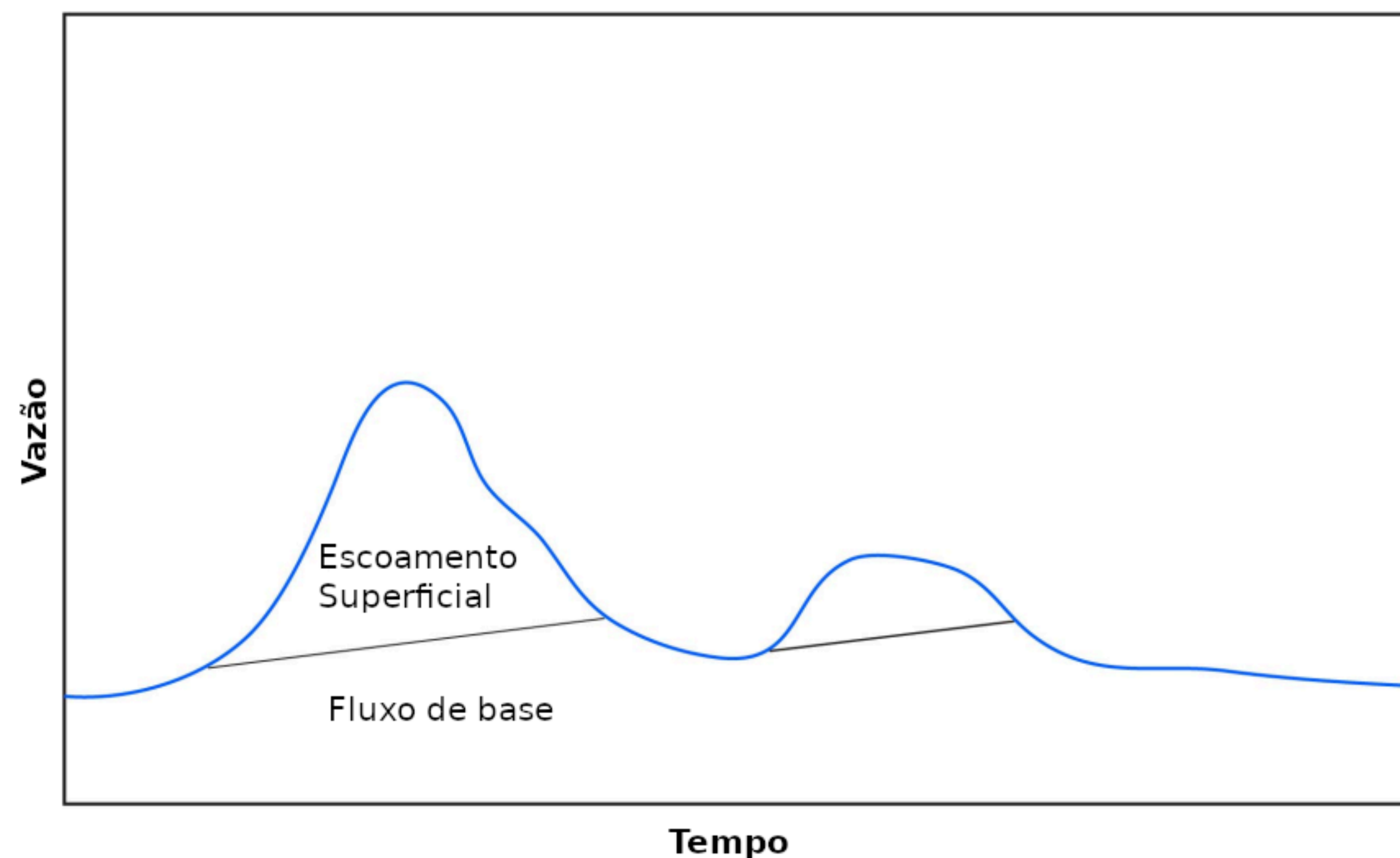


No primeiro caso (acima): área de 10 km²

No segundo caso (embaixo) área de 100 km²
(mesmos dados de vazão)

Separação do Fluxo de Base

Método 4 - Método de Hewlet e Hibbert (1967)



Jupyter notebook!

Exemplo 1

Método 1 - Método da Linha Reta

Em uma área de captação de 20 km² produziu-se o seguinte hidrograma de vazão na saída da bacia. Estimar o fluxo de base usando o método 1, calcular o volume de escoamento direto e a altura de escoamento direto (*runoff*).

Tempo do início														
da precipitação (h)	-6	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	
Vazão observada (m ³ /s)	6	5	13	26	21	16	12	9	7	5	5	4.5	4.5	

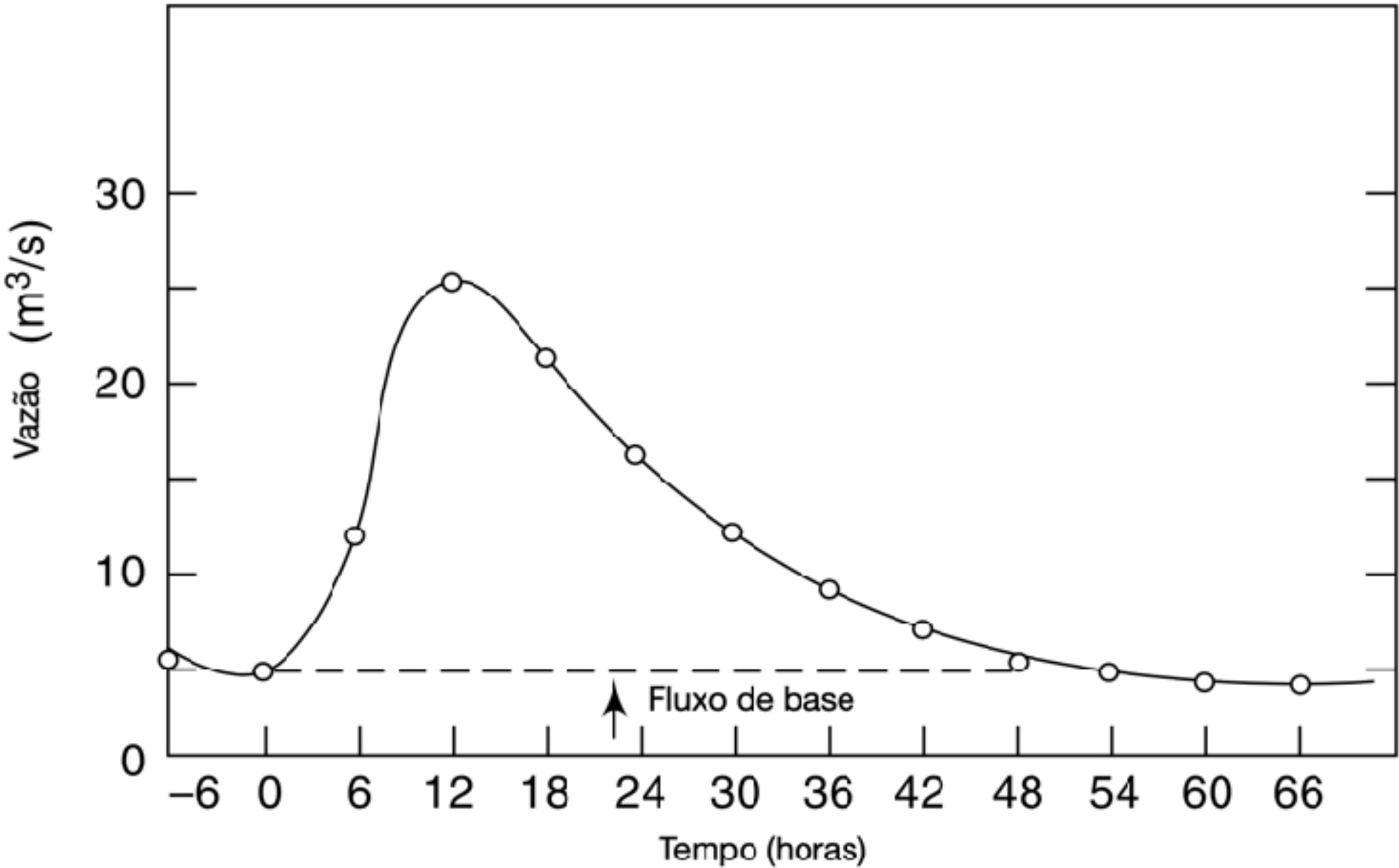
Exemplo 1

Método 1 - Método da Linha Reta

Em uma área de captação de 20 km² produziu-se o seguinte hidrograma de vazão na saída da bacia. Estimar o fluxo de base usando o método 1, calcular o volume de escoamento direto e a altura de escoamento direto (*runoff*).

Tempo do início da precipitação (h)	-6	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66
Vazão observada (m ³ /s)	6	5	13	26	21	16	12	9	7	5	5	4.5	4.5

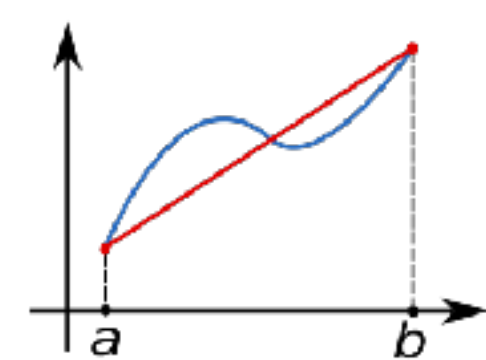
Solução: O hidrograma é traçado em escala. Vê-se que o hidrograma de um evento de chuva tem um componente de escoamento de base. Para usar o método simples de linha reta de separação de fluxo de base, calculamos N:



$$N = 0.83 \times (20)^{0.2} = 1,51 \text{ dias} = 36,2 \text{ h} \approx 36 \text{ h}$$

Como N = 36h e o tempo até o pico é 12h, assume-se que o escoamento direto existe de t = 0 a 48 h. Uma separação de fluxo de base em linha reta fornece um valor constante de 5 m³/s para o fluxo de base.

Para o cálculo da área do escoamento direto será usada integração numérica. O método adotado é a regra trapezoidal, conforme ilustra a Figura e Equação abaixo:



$$\int_a^b f(t)dt \approx (b - a) \left(\frac{f(a) + f(b)}{2} \right)$$

Exemplo 1

Método 1 - Método da Linha Reta

Em uma área de captação de 20 km² produziu-se o seguinte hidrograma de vazão na saída da bacia. Estimar o fluxo de base usando o método 1, calcular o volume de escoamento direto e a altura de escoamento direto (*runoff*).

Solução (continuação):

Para intervalos constantes de 6 horas como é o nosso caso, a equação para a integração pela regra trapezoidal é:

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{\Delta t}{2} \left(f(t_0) + 2f(t_1) + 2f(t_2) + 2f(t_3) + 2f(t_4) + \cdots + 2f(t_{N-1}) + f(t_N) \right)$$

Porém, neste caso:

- $f(t_0) = 0$ pois o escoamento direto em t=0 h é zero.
- $f(t_N) = 0$ pois o escoamento direto em t=48 h é zero. Portanto:

$$\int_a^b f(t)dt \approx \Delta t \left(f(t_1) + f(t_2) + f(t_3) + f(t_4) + \cdots + f(t_{N-1}) \right)$$

O intervalo de tempo é $\Delta t = 6$ horas, mas como a vazão tem unidade m³/s temos que converter o intervalo de tempo para segundo, ou seja: $\Delta t = 6 \times 60 \times 60$ horas

Subtraindo a vazão observada do escoamento de base, temos o escoamento direto:

Tempo do início da precipitação (h)	-6	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66
Vazão observada (m ³ /s)	6	5	13	26	21	16	12	9	7	5	5	4.5	4.5
Escoamento direto (m ³ /s)	-	0	8	21	16	11	7	4	2	0	-	-	-

O volume do escoamento direto é obtido pela integração do escoamento direto na hidrógrafa.

$$\begin{aligned} \text{Volume do escoamento direto} &= (6 \times 60 \times 60) \frac{1}{2} (8 + 21 + 16 + 11 + 7 + 4 + 2) \\ &= 3600 \times 6 \times (8 + 21 + 16 + 11 + 7 + 4 + 2) = 1,4904 \times 10^6 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Altura de Runoff} = \frac{\text{volume de escoamento direto}}{\text{area da bacia}} = \frac{1,4904 \times 10^6}{27 \times 10^6} = 0,0552 \text{ m} = 5,52 \text{ cm}$$

Exercício para casa

Método 1 - Método da Linha Reta

Em uma área de captação de 1 km² produziu-se o seguinte hidrograma de vazão na saída da bacia. Estimar o fluxo de base usando o método 1, calcular o volume de escoamento direto e a altura de escoamento direto (*runoff*).

Tempo do início														
da precipitação (h)	-6	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	
Vazão observada (m ³ /s)	6	5	13	26	21	16	12	9	7	5	5	4.5	4.5	

Exercício para casa

Método 1 - Método da Linha Reta

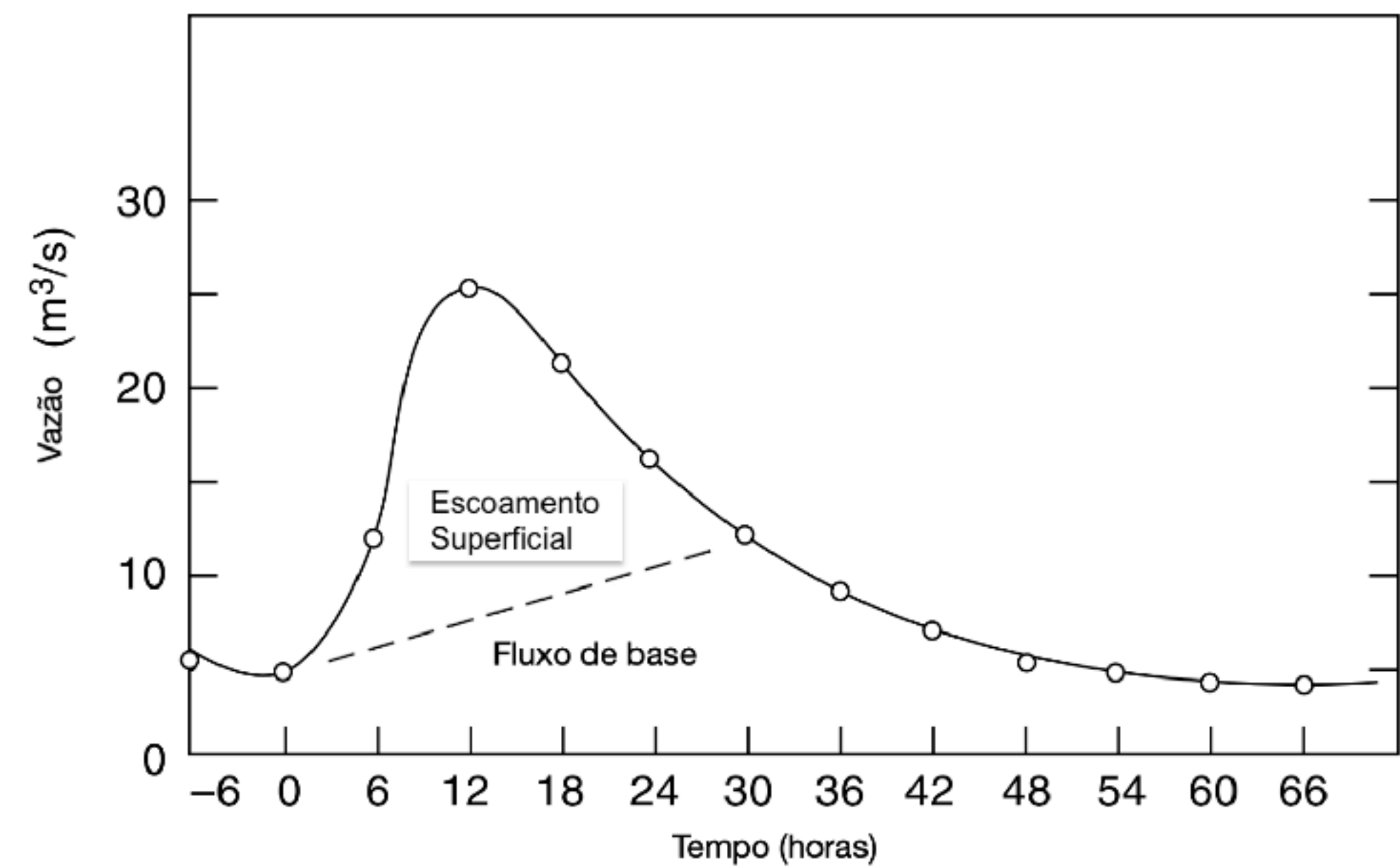
Em uma área de captação de 1 km² produziu-se o seguinte hidrograma de vazão na saída da bacia. Estimar o fluxo de base usando o método 1, calcular o volume de escoamento direto e a altura de escoamento direto (*runoff*).

Tempo do início da precipitação (h)	-6	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66
Vazão observada (m ³ /s)	6	5	13	26	21	16	12	9	7	5	5	4.5	4.5

$$N = 0.83 \times (1)^{0.2} = 0.83 \text{ dias} = 19,2 \text{ h} \approx 18 \text{ h}$$

Solução: Vamos considerar N = 18 horas para seguir os intervalos com dados de vazão. Portanto, o escoamento direto começa em t = 0, tem o pico em t = 12 h e termina em t = 12 + 18 = 30 h.

O hidrograma é traçado em escala, separando o escoamento direto do fluxo de base.



Dica para continuar a solução: encontrar a equação da reta que separa o escoamento direto do escoamento de base.

Referências bibliográficas

- DUNNE, T. Field studies of hillslope flow processes. In: KIRKBY, M. J. (Ed.). Hillslope hydrology. London: Wiley, 1978. chap. 7, p. 227-293.
- GRAYSON, R.; BLÖSCHL, G. Spatial patterns in catchment hydrology. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 408 p.
- HEWLETT, J. D.; HIBBERT, A. R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: SOPPER, W. E.; LULL, H. W. (Eds.). International Symposium on Forest Hydrology. Oxford: Pergamon Press, 1967. p. 275-290.
- HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Eos, Transactions, American Geophysical Union, v. 14, n. 1, p. 446-460, 1933. [AGU] <http://dx.doi.org/10.1029/TR014i001p00446>.
- LOEWEN, André Ricardo; PINHEIRO, Adilson. Overland flow generation mechanisms in the Concórdia River basin, in southern Brazil. RBRH, v. 22, 2017.
- Saadat, S., Frankenberger, J., Bowling, L., & Ale, S. (2020). Evaluation of surface ponding and runoff generation in a seasonally frozen drained agricultural field. Journal of Hydrology, 588, 124985.
- SUBRAMANYA, K. edition 3. Engineering hydrology. New Delhi. Tata McGraw Hill, p. 155-162, 2008.