

3-O ESCOAMENTO SUPERFICIAL

3.1–Considerações iniciais

As águas naturais são originadas por dois fenômenos principais: o escoamento subterrâneo e o escoamento superficial. Principalmente nos pequenos cursos d'água, quando ocorrem os picos de enxurrada, a maior parte da vazão escoada é de origem superficial, podendo o escoamento subterrâneo ser muitas vezes desprezado. Dessa forma, quando o escoamento superficial é estimado por modelos chuva-vazão, várias estruturas de controle podem ser dimensionadas como terraços, canais escoadouros, bueiros, aduelas, vertedores de pequenas barragens, drenos coletores e drenos principais de áreas úmidas, entre outras (PRUSKI, 2009).

3.2-Destinos da precipitação intensa que atinge uma bacia

Com o objetivo de melhor caracterizar o escoamento superficial, serão descritos, brevemente, os destinos da água proveniente de uma chuva intensa que atinge uma bacia vegetada.

1-Interceptação vegetal – O primeiro contato da água da chuva com a bacia se dá por meio da vegetação. A interceptação vegetal representa a fração da chuva que molha o dossel e que, terminada a chuva, evapora. Assim, do ponto de vista hidrológico, a interceptação vegetal representa uma perda. Do ponto de vista da modelagem desse efeito, a interceptação é considerada um “reservatório”, que pode estar cheio (dossel saturado) ou mais vazio (dossel seco). Dessa forma, se muitos dias sem chuva já transcorreram, a interceptação será maior do que após um dia chuvoso. Outra característica da interceptação vegetal está ligada à variação da quantidade interceptada em função da intensidade da chuva, pois, vários trabalhos mostram que em chuvas de intensidade baixa, pode-se ter todo o volume da chuva interceptado pela vegetação e, no outro extremo, em chuvas de intensidade alta, apenas uma pequena parte dela é interceptada. Assim, quando ocorre uma chuva intensa de dezenas de milímetros, a perda devida à interceptação tem um efeito

pequeno sobre o total precipitado. Por outro lado, quando se contabiliza o total precipitado em um ano, a interceptação pode atingir valores entre 10 a 20%.

2-Retenção na zona radicular – A água que atravessou o dossel e atingiu o solo poderá se infiltrar e passar a fazer parte do armazenamento disponível às plantas; essa fração também representa uma perda, pois irá retornar à atmosfera por evapotranspiração. A magnitude do armazenamento na zona das raízes depende da profundidade do sistema radicular e do tipo de solo; ela é da ordem de alguns milímetros por centímetro de solo explorado pela planta (ALLEN et al., 1988; ACOSTA et al.; 2009).

3-Armazenamento superficial – Se a precipitação persiste, a velocidade de infiltração da água no solo diminui e a água começa a se acumular na superfície do terreno, constituindo o armazenamento superficial. A modelagem desse fenômeno costuma dividir esse armazenamento em micro-armazenamento (rugosidade do terreno) e macro-armazenamento (depressões e poças d'água). A ordem de grandeza dessa fração da chuva depende bastante do tipo de superfície e varia de poucos milímetros para superfícies sistematizadas a algumas dezenas de milímetros para o caso de intensa ondulação do terreno. A água retida no armazenamento superficial irá infiltrar e ser transpirada pela vegetação ou evaporar diretamente; portanto, essa fração da chuva também representa uma perda, do ponto de vista hidrológico.

4-Escoamento superficial – Quando a água das poças transborda, dá-se o início do escoamento superficial. A água escorre inicialmente na forma de uma lâmina na superfície do terreno e depois se junta formando sulcos. Em seguida atinge as ravinas de drenagem (cursos d'água efêmeros) e, na sequência, o curso d'água perene, escoando neste até a seção de controle de interesse. O escoamento superficial é tido como um escoamento rápido; a ordem de grandeza de sua velocidade se assemelha à de uma pessoa andando em passos rápidos. Por isso, esse escoamento dará origem a uma resposta rápida em termos de aumento de vazão do curso d'água.

5-Escoamento sub-superficial – Esse escoamento é aquele que se dá quando a água infiltra no solo, atinge um horizonte de menor permeabilidade e passa a escoar sobre esse horizonte, paralelamente à superfície do terreno. Espera-se que esse tipo de escoamento seja importante no fundo da camada de solo arada ou em solos em que há um gradiente textural forte entre os horizontes A e B, como em alguns argissolos e planossolos; em latossolos profundos sem compactação o escoamento sub-superficial tende a ser mínimo. Sua quantificação é difícil, mas espera-se que seja um movimento quase tão rápido quanto o escoamento superficial. Assim, do ponto de vista prático, o escoamento sub-superficial é englobado pelo superficial, que pode ser modelado com maior facilidade.

6-Escoamento subterrâneo – Representa o movimento da água que percolou profundamente e atingiu o lençol freático. Sua velocidade depende da condutividade hidráulica do solo saturado e do gradiente de potencial da água no solo; costuma ser extremamente lento, de forma que a água pode levar semanas ou meses para atingir a seção de saída. Essa característica faz com que o escoamento subterrâneo garanta a perenidade do curso d'água quando a precipitação cessa.

7-Precipitação direta na calha – Representa a fração da precipitação que ocorreu diretamente sobre a calha dos cursos d'água perenes. Quando se compara a superfície desses cursos d'água com a área da bacia, verifica-se que a primeira é muito pequena na maioria das vezes, de forma que a precipitação direta na calha pode ser desprezada.

3.3-Representação do escoamento superficial

Na Figura 3.1 está representado um fluviograma (gráfico da vazão em função do tempo) de um rio. Se fosse possível separar a fração do escoamento de origem subterrânea daquela de origem superficial, possivelmente a área achurada representaria a vazão subterrânea (ou vazão de base), que sofre uma variação bem menor do que o escoamento total. Os picos de vazão são originados pela ocorrência de precipitações intensas sobre a bacia, e estão associados à precipitação que os causaram (MARCELLINI, 1994).

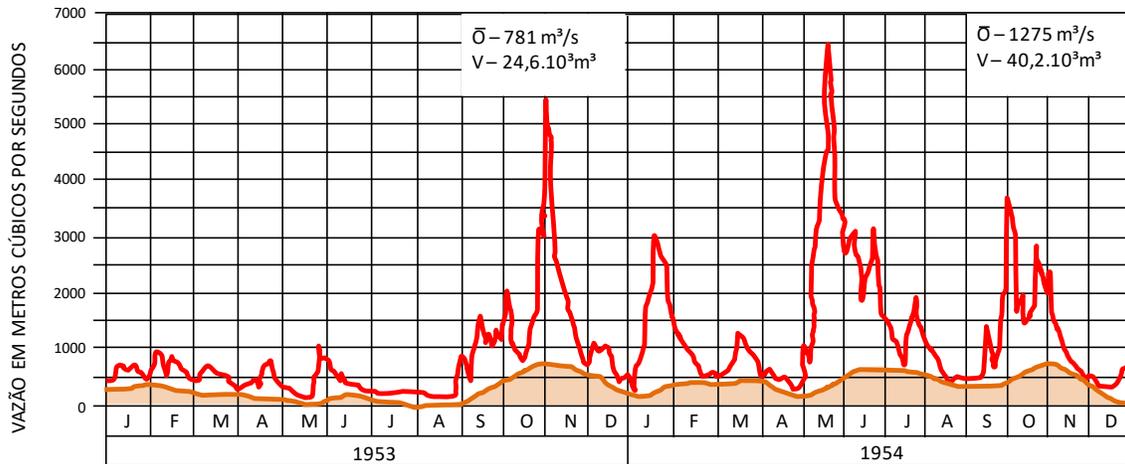


Figura 3.1 - Fluviograma de um curso d'água, englobando um período de 2 anos. A área achurada representa a contribuição subterrânea.

A Figura 3.2 representa, esquematicamente, um dos picos observados na Figura anterior, associado à respectiva chuva que o causou. A representação da chuva ($i \times t$) é chamada de hietograma e a representação da respectiva variação de vazão na seção de controle ($Q \times t$) é denominada hidrógrafa ou hidrograma. No hietograma, estão separados os destinos da precipitação arbitrariamente, desprezando-se a fração da chuva que caiu sobre a calha. Os destinos 1, 2 e 3 se referem à fração da chuva que retorna à atmosfera (perdas); os destinos 4 e 5 representam o escoamento rápido em direção ao curso d'água, enquanto o 6 representa a contribuição subterrânea. A fração da chuva responsável pela resposta rápida do curso d'água (4 e 5) é denominada de precipitação efetiva; ela está intimamente relacionada ao pico do hidrograma. Já o escoamento subterrâneo (6), por ser muito lento, não tem resposta imediata com o escoamento de base.

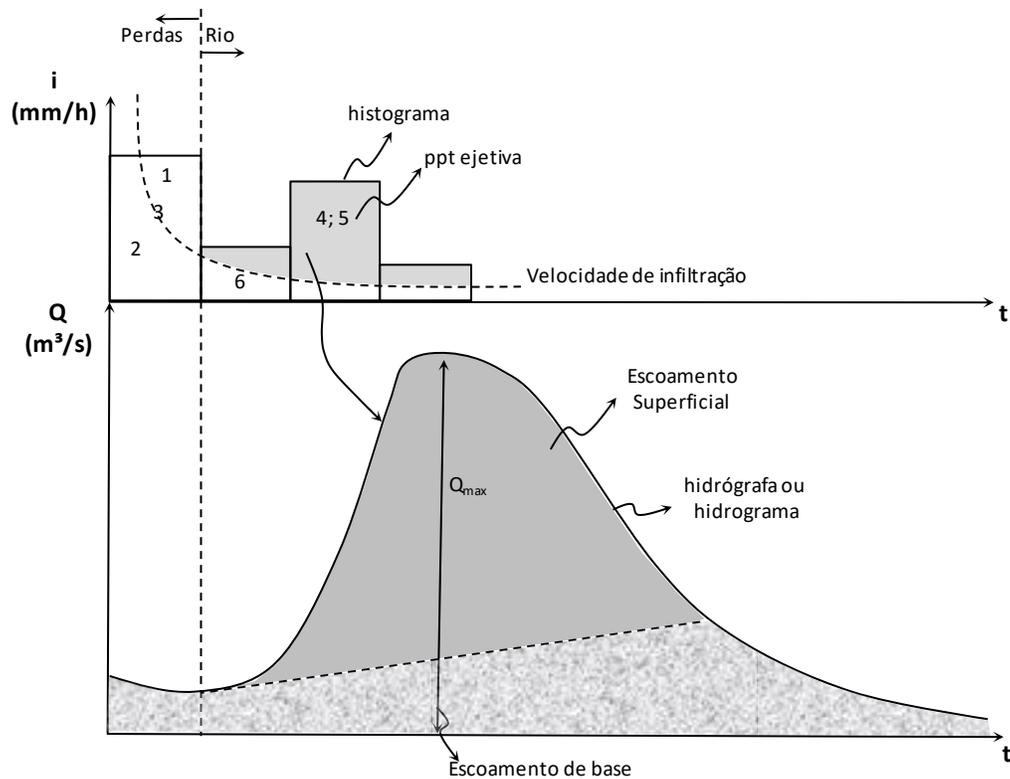


Figura 3.2 - Hietograma e hidrograma correspondente.

Tendo em vista que o escoamento superficial (englobando também o sub-superficial) é aquele que será o responsável pela maior parte do pico de descarga (Q_{max}), e que ele está intimamente relacionado à fração efetiva da precipitação intensa, pode-se determinar Q_p (vazão de pico de escoamento superficial) por meio de um modelo chuva-vazão e assumir que Q_p pode ser considerado uma boa aproximação de Q_{max} (Figura 3.3).

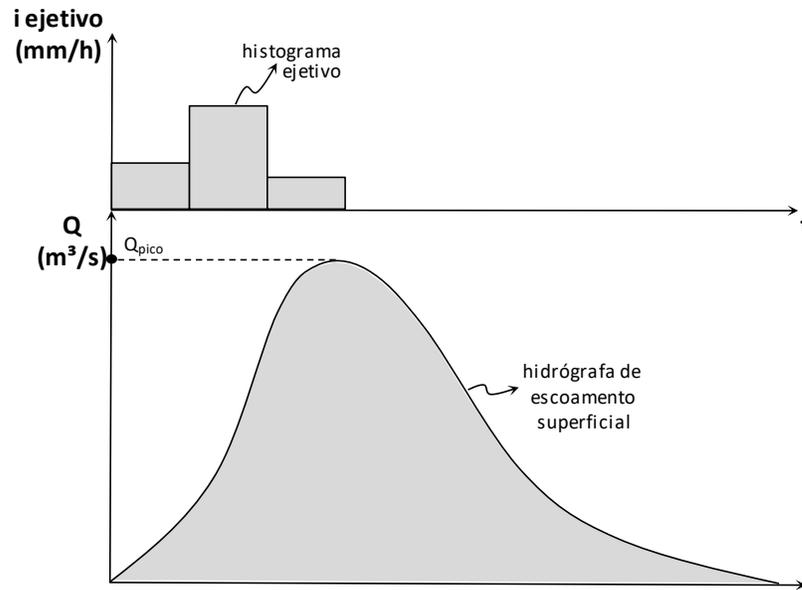


Figura 3.3 - Histograma efetivo e hidrograma de escoamento superficial.

3.4-Estimativa do escoamento superficial

3.4.1-A Fórmula Racional

Até meados do século XIX, as expressões utilizadas para se prever picos de escoamento eram simples correlações empíricas entre vazões de cheia e áreas de bacias; a maior parte dessas fórmulas foi obtida por meio de observações realizadas na Europa e nos Estados Unidos e, portanto, não podiam ser utilizadas em outras regiões. Dentre essas destacam-se as fórmulas de Meyer, Cook, Cypress Creek, Iskowsky, entre outras.

Em 1851, um engenheiro irlandês denominado Mulvaney apresentou a proposta do método denominado Racional, que foi o primeiro a transcender a simples experimentação. Segundo esse método, a vazão de pico de escoamento superficial ocorreria para uma chuva de duração igual ao *tempo de concentração* da bacia (t_c); esse tempo corresponde à trajetória de uma gota de água, desde o ponto hidrologicamente mais distante até a seção de saída. Isto por que a chuva deve ser suficientemente longa para que toda a bacia contribua simultaneamente, mas também curta o suficiente, já que a intensidade das chuvas intensas diminui com a duração.

Mulvaney, por simplicidade, imaginou uma chuva com distribuição temporal homogênea, de duração igual ao t_c , que geraria uma hidrógrafa de escoamento superficial com a forma de um triângulo isósceles, conforme é ilustrado na Figura 3.4.

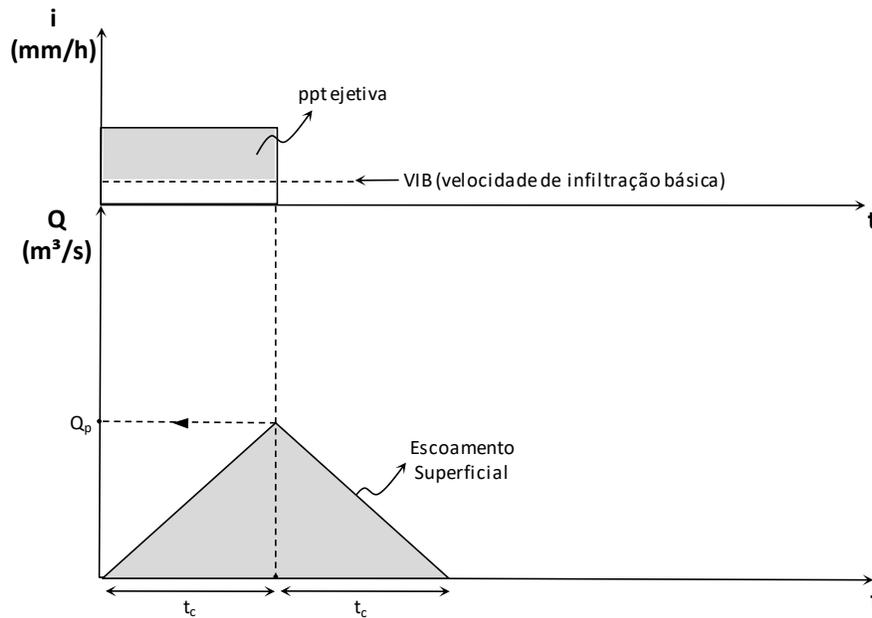


Figura 3.4 - Hietograma e hidrograma triangular de escoamento superficial segundo Mulvaney (1851).

Considerando que a área sob o hietograma efetivo e sob o hidrograma representam, respectivamente, lâmina e volume escoados, pode-se escrever:

Volume chuva efetiva = Volume escoamento superficial

Ppt. Efet. x Área bacia = Volume escoamento superficial **equação 3.1**

Definindo-se o chamado coeficiente de escoamento superficial (C) como:

$$C = \frac{\text{ppt. efet.}}{\text{ppt. total}} \quad \text{equação 3.2}$$

E substituindo-se 3.2 em 3.1, obtém-se:

$$C \cdot \text{ppt. total} \cdot \text{Área} = \frac{Q_p \cdot 2t_c}{2} \quad \therefore Q_p = \frac{C \cdot \text{ppt total} \cdot A}{t_c}$$

$$Q_p (\text{m}^3 / \text{s}) = C (\text{adimensional}) \cdot i (\text{m/s}) \cdot A (\text{m}^2)$$

Alterando-se as unidades obtém-se:

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{360}$$

equação 3.3

Em que:

Q_p – vazão de pico de escoamento superficial, m³ . s⁻¹;

C – coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

i – intensidade média da chuva de duração igual ao tempo de concentração, mm. h⁻¹; e

A – área de contribuição, ha.

O coeficiente C pode ser obtido em tabelas; na literatura especializada são encontradas dezenas delas (TUCCI e MARQUES, 2000). Nesse texto utilizar-se-á aquela que é a mais completa para áreas rurais (Soil Conservation Service – USA), apresentada na Tabela 3.1. Nela, o coeficiente C é função da textura do solo, do declive do terreno e do tipo de superfície; quando a área de contribuição apresentar-se de forma heterogênea, deve ser usado um valor médio ponderado em função do tamanho de cada sub-área.

Tabela 3.1 – Coeficientes de escoamento superficial para áreas rurais.

Declive %	TIPO DE SOLO		
	Barro arenoso	Barro argiloso-limoso	Argiloso
Florestas			
0 - 5	0,10	0,30	0,40
5 - 10	0,25	0,35	0,50
10 - 30	0,30	0,50	0,60
Pastagens			
0 - 5	0,10	0,30	0,40
5 - 10	0,15	0,35	0,55
10 - 30	0,20	0,40	0,60
Terras cultivadas			
0 - 5	0,30	0,50	0,60
5 - 10	0,40	0,60	0,70
10 - 30	0,50	0,70	0,80

O tempo de concentração é obtido calculando-se o tempo gasto em possíveis trajetórias da gota d'água sobre a área de contribuição; a trajetória mais longa fornecerá o t_c , ou seja:

$$t_c = \left(\sum t_p \right)_{MAX} \quad \text{equação 3.4}$$

$$t_p = \frac{L}{V} \quad \text{equação 3.5}$$

$$V = K \cdot \sqrt{I} \quad \text{equação 3.6}$$

Em que:

t_c - tempo de concentração, seg;

t_p – tempo de percurso parcial, seg.;

L – comprimento do percurso, m; e

V – velocidade do escoamento superficial, $m.s^{-1}$.

O valor do coeficiente K pode ser encontrado na Tabela 3.2, e é função do tipo de superfície sobre a qual a água escoar.

Tabela 3.2 - Expressões para o cálculo da velocidade do escoamento superficial em função da natureza da superfície.

1. Floresta ou mata natural com grande depósito vegetal na superfície do solo; Forrageiras fechadas formando estolões; Braquiárias; grama:	$V = 0,08\sqrt{I}$
2. Solo não cultivado; Cultivo mínimo em faixas; Área reflorestada:	$V = 0,15\sqrt{I}$
3. Pastagens de baixo porte em touceiras:	$V = 0,21\sqrt{I}$
4. Terreno cultivado:	$V = 0,27\sqrt{I}$
5. Solo nu; Formações de aluviões em leque em direção ao vale:	$V = 0,30\sqrt{I}$
6. Canais com vegetação; Terraços ou depressões naturais com vegetação; Talvegue:	$V = 0,45\sqrt{I}$
7. Áreas pavimentadas; Sulcos de erosão:	$V = 0,60\sqrt{I}$

Exemplo 3.1

Calcular o t_c de uma bacia sabendo-se que a trajetória que fornece o maior tempo é de 300 m em solo com cobertura de mata e declive 21% mais 1,6 Km no talvegue com declive 3 por mil.

Solução:

$$t_c = t_{p_{\text{mata}}} + t_{p_{\text{talvegue}}}$$

$$t_c = \frac{300 \text{ m}}{0,08\sqrt{21}} + \frac{1.600 \text{ m}}{0,45\sqrt{0,3}} = 7.309,8 \text{ seg} = 2,03 \text{ horas}$$

Exemplo 3.2

Estimar a vazão de pico de escoamento superficial para uma bacia de 50 ha e um período de retorno de 5 anos pelo método racional. Utilizar a Tabela de chuvas 2.2 (Capítulo 2), $t_c = 2,0$ horas e $C = 0,30$.

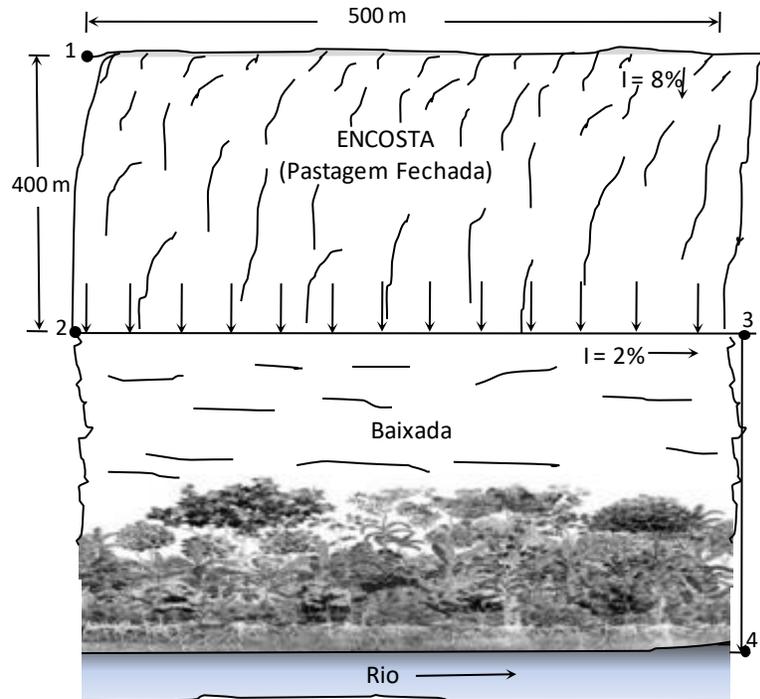
Solução:

$$i = \frac{h}{t} = \frac{58 \text{ mm}}{2,0 \text{ horas}} = 29,0 \text{ mm/h}$$

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} = \frac{0,30 \cdot 29,0 \cdot 50}{360} = 1,208 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Exemplo 3.3

Calcular a vazão de pico de escoamento superficial para o dreno de cintura (2-3-4) da Figura a seguir:



Dados complementares:

- Considerar a equação da chuva: $i = \frac{2.017,05 \cdot T^{0,16}}{(t + 21)^{0,91}}$

- Considerar solo argiloso e período de retorno de 10 anos.

Solução:

$$t_c = t_{p_{encosta}} + t_{p_{dreno}} = \frac{400m}{0,08\sqrt{8}} + \frac{500m}{0,45\sqrt{0,2}} = 4.252 \text{ seg} = 70,9 \text{ min}$$

$$i = \frac{2.1017,05 \cdot 10^{0,16}}{(70,9 + 21)^{0,91}} = 47,65 \text{ mm/h}$$

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} = \frac{0,55 \cdot 47,65 \cdot 20}{360} = 1,456 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Observação 1:

Não sendo possível se identificar com precisão os tipos de solo e o declive das subáreas, visando à estimativa do coeficiente C, considera-se aceitável utilizar a Tabela 3.3, que permite uma estimativa preliminar do valor de C, muito usada quando se lança mão de imagens de satélite da área, como as do Google Earth, por exemplo.

Tabela 3.3 – Valores de coeficiente de escoamento superficial para estimativas expeditas.

USO DO SOLO OU GRAU DE URBANIZAÇÃO	VALORES	
	Mínimos	Máximos
Área totalmente urbanizada Urbanização futura	0,50	0,70
Área parcialmente urbanizada Urbanização moderada	0,35	0,50
Área predominantemente de plantações, pastos, etc. Urbanização atual	0,20	0,35

Observação 2:

Não sendo possível se testar as diferentes trajetórias da gota d'água para se obter o valor de t_c , pode-se lançar mão de fórmulas empíricas simplificadas. A expressão 3.7, também conhecida como Fórmula do Califórnia Culverts Practice and Public Work, é uma das mais usadas para esse propósito:

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^2}{I_{eq}} \right)^{0,385} \quad \text{equação 3.7}$$

Em que:

t_c – tempo de concentração, minutos;

L – comprimento do talvegue, Km;

I_{eq} – declividade equivalente do talvegue, $m.Km^{-1}$.

3.4.2-Limitações da Fórmula Racional

Modelos simplificados, como o Método Racional, utilizam uma série de pressuposições simplificadoras (PRUSKI et al., 2006). Dentre esses modelos, os mais bem sucedidos são aqueles em que algumas simplificações que tendem a favor da segurança são contrabalançadas por outras que agem em sentido inverso (TUCCI, 1998). As principais simplificações do Método Racional são as seguintes:

- 1- A chuva é considerada homogeneamente distribuída sobre a bacia, ou seja, a distribuição espacial da chuva não é considerada;
- 2- Não são consideradas diferentes distribuições temporais da chuva; esta é considerada uniforme ao longo do tempo;
- 3- A umidade do solo no momento em que ocorre a chuva intensa não é levada em consideração, assumindo-se que o solo esteja próximo à saturação;
- 4- O fato do coeficiente C possivelmente diminuir para chuvas mais longas (menos intensas) não é considerado;
- 5- O intervalo de tempo que vai do início da chuva ao início do escoamento é desprezado;
- 6- O amortecimento da onda de cheia proporcionado pelo enchimento da calha do curso d'água é desprezado; e
- 7- A possibilidade de chuvas com duração menor que o t_c causarem maior pico, apesar da área ainda não estar contribuindo em sua totalidade, não é considerada.

O conjunto dessas simplificações tende a favor da segurança; entretanto, para áreas pequenas este fato é até considerado positivo, devido às pequenas vazões envolvidas. Por outro lado, para áreas maiores, as pressuposições (1), (4) e (6) tendem a acarretar uma superestimativa inaceitável da vazão. Assim sendo, a Fórmula Racional é recomendada apenas para áreas menores que 50 ha (DAEE, 2005).

3.4.3-A Fórmula Racional Modificada

Na literatura são encontradas diversas propostas de coeficientes de abatimento que visam corrigir, empiricamente, a tendência de superestimativa da vazão apresentada pela Fórmula Racional quando aplicada a áreas maiores. A equação 3.8 é uma proposta do DAEE (2005) para áreas maiores que 50 ha e menores que 200 ha.

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} \cdot D ; \text{ sendo } D = 1 - 0,009 \cdot \frac{L}{2} \quad \text{equação 3.8}$$

Em que:

Q_p – vazão de pico de escoamento superficial, m³/s;

C – coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

i – intensidade da chuva de duração igual ao tempo de concentração, mm/h;

A – área de contribuição, ha;

D – coeficiente de abatimento da vazão; adimensional; e

L – comprimento do talvegue, Km.

3.4.4-A Fórmula de I – Pai - Wu

Publicada em 1963 por autor americano, com contribuições de um revisor português, a fórmula de I – Pai – Wu (3.9) é, na verdade, uma modificação do Método Racional, feita por meio da utilização de coeficientes empíricos de abatimento. Esses coeficientes procuram corrigir as limitações (1), (4) e (6) citadas anteriormente. Seu uso é recomendado pelo DAEE (2005) para áreas maiores que 200 ha e menores que 20.000 ha.

$$Q_p = 0,278 \cdot C^* \cdot i \cdot A^{0,90} \cdot k \quad \text{equação 3.9}$$

Sendo:

$$C^* = C \cdot \frac{\left(\frac{2}{1+F}\right)}{\left(\frac{4}{2+F}\right)} \quad e \quad \text{equação 3.10}$$

$$F = \frac{L}{2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}}} \quad \text{equação 3.11}$$

Em que:

Q_p – vazão de pico de escoamento superficial, m³/s;

C* - coeficiente de escoamento superficial corrigido, adimensional;

i – intensidade da chuva de duração igual ao tempo de concentração, mm/h;

A – área de contribuição, Km²;

k – coeficiente de abatimento da chuva (Figura 3.5);

F – fator de forma de I – Pai – Wu, adimensional, (ver Capítulo 1);

L – comprimento do talvegue, Km;

Como a fórmula de I – Pai – Wu é aplicada a áreas maiores, onde possivelmente o escoamento subterrâneo passa a ter importância, para a estimativa da vazão máxima o DAEE (2005) sugere dar-se uma folga de 10% sobre Q_p, ou seja:

$$Q_{\max} = 1,10 \cdot Q_p \quad \text{equação 3.12}$$

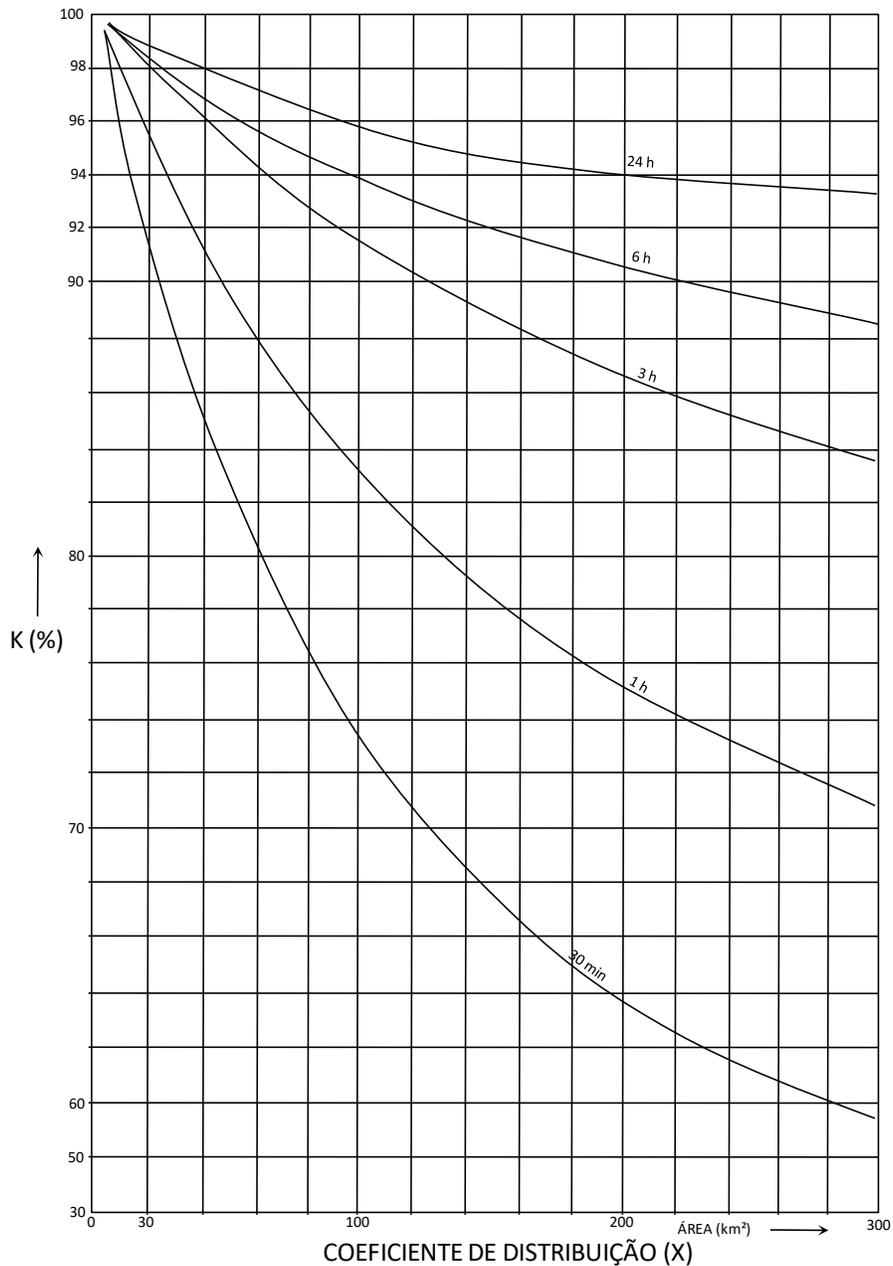


Figura 3.5 – Gráfico para a estimativa do coeficiente de abatimento da chuva (k) em função da área da bacia (A) e da duração da chuva (t).

Exemplo 3.4:

Calcular a vazão máxima de um curso d'água (Q_{max}) pelo Método de I – Pai – Wu, e comparar com o resultado que seria obtido caso tivesse sido aplicado, por engano, o Método Racional.

Dados:

$$A = 20.000 \text{ ha}$$

$$C = 0,30$$

$$L = 35 \text{ Km}$$

$$I = 1,8 \text{ m/Km}$$

$$\text{Usar a seguinte equação de chuva: } i = \frac{2017,05 \cdot T^{0,16}}{(t + 21)^{0,91}}$$

$$\text{Usar } T = 50 \text{ anos}$$

Solução:

1º) Pelo Método de I – Pai – Wu

$$F = \frac{L}{2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}}} = \frac{35}{2 \cdot \sqrt{\frac{2000}{\pi}}} = 2,19$$

$$C^* = C \cdot \frac{\left(\frac{2}{1+F}\right)}{\left(\frac{4}{2+F}\right)} = 0,30 \cdot \frac{\left(\frac{2}{1+2,19}\right)}{\left(\frac{4}{2+2,19}\right)} = 0,30 \cdot 0,657 = 0,197$$

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^2}{I}\right)^{0,375} = 57 \cdot \left(\frac{35^2}{1,8}\right)^{0,385} = 702,3 \text{ minutos} = 11,7 \text{ horas}$$

$$i = \frac{2017,05 \cdot T^{0,16}}{(t + 21)^{0,91}} = \frac{2.1017,05 \cdot 50^{0,16}}{(702,3 + 21)^{0,91}} = 9,43 \text{ mm/h}$$

$$K \text{ (Figura 3.5)} \rightarrow 0,92$$

$$Q_p = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A^{0,90} \cdot k = 0,278 \cdot 0,197 \cdot 9,43 \cdot 200^{0,90} \cdot 0,92 = 55,9 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{\max} = 1,10 \cdot Q_p = 1,10 \cdot 55,9 = 61,5 \text{ m}^3 / \text{s}$$

2º) Pelo Método Racional

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} = \frac{0,30 \cdot 9,43 \cdot 20.000}{360} = 157,2 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{\max} = Q_p = 157,2 \text{ m}^3 / \text{s}$$

3.4.5-Fórmula de MacMath

Assim como a Fórmula de I – Pai – Wu, a de MacMath também apresenta o mesmo fundamento da Fórmula Racional, e utiliza coeficientes de abatimento para evitar superestimativa da vazão, quando aplicada a áreas maiores (3.13). É bastante utilizada pelos técnicos da Ruralminas e da CODEVASF para a estimativa do escoamento superficial em áreas maiores que 500 ha, visando o dimensionamento de obras de macrodrenagem. Quando comparada com a fórmula de I – Pai – Wu, fornece valores de picos de enxurrada bem mais baixos.

$$Q_p = 0,0091 \cdot C_{MM} \cdot i \cdot A^{4/5} \cdot I^{1/5} \quad ; \quad Q_{\max} = 1,10 \cdot Q_p \quad \text{equação 3.13}$$

Em que:

Q_p – vazão de pico de escoamento superficial, m³/s;

C_{MM} – coeficiente de escoamento superficial de MacMath (Tabela 3.4);

i – intensidade da chuva de duração igual ao tempo de concentração, mm.h⁻¹;

A – área de contribuição, ha;

I – declividade do talvegue, m.m⁻¹; e

Q_{max} – vazão máxima de escoamento total do curso d'água, m³/s.

Tabela 3.4 – Coeficientes de escoamento superficial de MacMath (C_{MM}).

Condições de escoamento	Cobertura Vegetal	Textura	Topografia
Baixa	Gramínea (0.08)	Arenosa (0.12)	Plana (0.04)
Moderada	Intensa (0.12)	Leve (0.12)	Ligeiramente ondulada (0.06)
Média	Razoável à rala (0.16)	Média (0.16)	Ondulada à montanhosa (0.08)
Alta	Razoável à esparsa (0.22)	Pesada (0.16)	Montanhosa à escarpada (0.11)
Muito alta	Esparsa à descoberta (0.30)	Pesada ou rochosa (0.30)	Escarpada (0.15)

* valor de C_{MM} = soma dos três coeficientes selecionados para caracterizar a bacia

Exemplo 3.5:

Refazer o exemplo 3.4 pela Fórmula de MacMath, considerando $C_{MM} = C$

Solução:

$$Q_p = 0,0091 \cdot C_{MM} \cdot i \cdot A^{4/5} \cdot I^{1/5}$$

$$Q_p = 0,0091 \cdot 0,30 \cdot 9,43 \cdot 20.000^{0,8} \cdot 0,0018^{0,2} = 20,1 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{\max} = 1,10 Q_p = 1,10 \cdot 20,1 = 22,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.5-O Método de Ven te Chow

O método em questão foi apresentado em 1962 com o objetivo de determinar a vazão de pico de pequenas bacias rurais, para projeto de obras de travessias de menor porte em rodovias, como bueiros e pequenas pontes. Foi desenvolvido tendo como base análises teóricas do método do hidrograma unitário e um grande conjunto de dados obtidos a partir de 60 eventos de cheias observados em 20 bacias de drenagem rurais nos EUA.

O método Ven Te Chow é recomendado para ser utilizado em bacias com área de drenagem entre 2 e 50 km² (DER, 2001). Utiliza a teoria do hidrograma unitário considerando observações conceituadas e práticas decorrentes da aplicação dessa teoria, como as que são citadas por Fadiga Junior e Martins (2003) e listadas a seguir:

1) Para um mesmo período de retorno, à medida que a duração da chuva aumenta, sua intensidade média diminui. Por outro lado, à medida que a duração da chuva aumenta, a taxa de infiltração diminui, ou seja, uma parcela maior da chuva se transforma em escoamento superficial direto. Não se pode, assim, afirmar “a priori” qual duração da chuva irá fornecer a vazão de pico de uma dada bacia;

2) Uma chuva efetiva de intensidade constante, que perdure indefinidamente, irá acarretar uma vazão de equilíbrio igual ao valor dessa intensidade multiplicada pela área da bacia, após transcorrido o tempo necessário para que toda a bacia esteja contribuindo para o escoamento: esta hipótese é a base do “Método Racional”. No entanto, caso a duração da chuva não alcance esse tempo, o pico do hidrograma resultante será inferior à referida vazão de equilíbrio e o valor fornecido pela equação do Método Racional será superestimado;

3) A intensidade da chuva, regra geral, não permanece constante durante a ocorrência da tormenta, podendo variar de forma qualquer, acarretando uma vazão de pico diferente daquela associada à chuva de intensidade uniforme.

Após analisar estes fatores, Ven Te Chow propôs o método (equação 3.14) que leva o seu nome:

$$Q_{\max} = \frac{A.X.Y.Z}{3,6} \quad \text{equação 3.14}$$

Em que:

Q_{max} - vazão máxima em m³/s;

A - área da bacia, km²;

X - fator de deflúvio, mm/h;

Y - o fator climático, adimensional;

Z - fator de redução do tempo de pico, adimensional.

O fator X é igual à razão da precipitação excedente pela duração (3.15)

$$X = \frac{\text{ppt efetiva}}{tc} \quad \text{equação 3.15}$$

Em que:

A precipitação efetiva pode ser calculada pela fórmula do SCS (3.16);

$$\text{ppt efetiva} = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P + 0,8.S} \quad ; \quad S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) . 25,4 \quad \text{equação 3.16}$$

Em que:

P - precipitação total, mm;

CN - fator CN do SCS que pode ser obtido em várias tabelas publicadas, como as de Tucci (2009) que estão nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Os tipos de solos citados nas Tabelas a seguir são os seguintes:

Solo Tipo A: Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila.

Solo Tipo B: Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média.

Solo Tipo C: Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo.

Solo Tipo D: Solos contendo argilas expansivas e poucos profundos, com muita baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Tabela 3.5 – Valores do parâmetro CN para bacias rurais.

Uso do solo	Superfície	A	B	C	D
Solo Lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações Regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de Cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de Legumes ou Cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
Pastagens	Boas	39	61	74	80
	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos Permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras Estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muitos esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: Tucci (2009)

Tabela 3.6 – Valores do parâmetro CN para bacias rurais.

Utilização ou cobertura do solo		A	B	C	D
Zonas cultivadas:	Sem conservação do solo	72	81	88	91
	Com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições		68	79	86	89
Baldios	Boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas	cobertura ruim	45	66	77	83
Florestais:	Cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios, boas condições com relva em mais de 75% da área		39	61	74	80
Com relva de 50 a 75% da área		49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					
Lotes de (m ²)	% média impermeável				
<500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.		98	98	98	98
Arruamentos e estradas					
asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
paralelepípedos		76	85	89	91
terra		72	82	87	89

Fonte: Tucci (2009)

O fator climático (Y) da equação 3.14 é a relação entre a chuva anual do posto pluviométrico de onde foi obtida a equação de intensidade-duração-frequência das chuvas e a chuva anual do local do projeto.

O fator de redução do tempo de pico (Z) da equação 3.14 pode ser obtido pelas equações 3.17 e 3.18.

$$Z = 0,0101 + 0,8507 \left(\frac{t}{t_l} \right) - 0,227 \left(\frac{t}{t_l} \right)^2 + 0,0247 \left(\frac{t}{t_l} \right)^3 \quad \text{equação 3.17}$$

$$t_l = 0,005055 \left(\frac{L}{I\Delta} \right)^{0,64} \quad \text{equação 3.18}$$

Em que:

t - tempo de concentração, horas;

L - comprimento axial da bacia, medido em linha reta, metros;

$I\Delta$ - declividade média do triângulo de área equivalente, porcentagem, (ver Capítulo 1).

Como a duração da chuva para a qual a vazão será máxima é desconhecida, é necessário adotar-se um processo iterativo de cálculo, conforme descrito a seguir:

- arbitram-se valores para a duração da chuva; pode-se partir do tempo de concentração e adicionar-se e subtrair-se uma constante;
- calcular a intensidade da chuva (com tempo de retorno pré-estabelecido) para as durações arbitradas; pode-se, para isso, utilizar as equações de intensidade-duração-frequência disponíveis para diversas localidades do país;
- calcular a precipitação total;
- calcular a precipitação efetiva, utilizando valor de fator CN previamente estabelecido;
- calcular as variáveis X , Y e Z e por fim calcular a vazão máxima.

Exemplo 3.6:

Calcular Q_{max} supondo os seguintes dados:

$A = 20 \text{ km}^2$;

$L = 10 \text{ km}$;

$t_c = 4 \text{ horas}$;

$I\Delta = 2\%$;

$CN = 70$;

$T = 100 \text{ anos}$;

$$\text{Equação IDF de Piracicaba } i = \frac{2.017,05 \cdot T^{0,16}}{(t + 21)^{0,91}};$$

Ppt do posto pluviométrico = 1400 mm;

Ppt do local do projeto = 1300mm.

Solução:

tc	i	P	PEFET	X	Y	t/tl	Z	Q
h	mm/h	mm	mm	mm/h	ad	ad	ad	m ³ /s
4,0	26,64	106,57	37,13	9,28	0,93	0,778	0,546	26,22
4,5	24,13	108,59	38,52	8,56	0,93	0,875	0,597	26,44
5,0	22,07	110,35	39,74	7,95	0,93	0,973	0,645	26,53
5,5	20,35	111,91	40,83	7,42	0,93	1,070	0,691	26,51

Conclui-se, portanto, que a vazão procurada está associada ao tempo de 5,0 horas, e vale 26,53 m³/s (embora o tc seja de 4 horas).

3.6-O Método da Hidrógrafa Unitária

Segundo Fadiga Junior e Martins (2003), a grande maioria dos métodos hidrológicos para determinação de hidrogramas de cheia obedece aos princípios da teoria do hidrograma unitário, inclusive o Método Racional, que é um caso particular da mesma. A hipótese central desta teoria afirma que a relação entre a chuva excedente e as vazões do hidrograma de cheias é linear; pode-se afirmar que todo método baseado na linearidade desta relação recai na teoria do hidrograma unitário.

O Hidrograma Unitário é o hidrograma produzido por uma chuva unitária excedente, distribuída uniformemente sobre a bacia, com uma duração específica. A chuva unitária excedente é escolhida, por convenção, com a unidade de lâmina de 1 cm ou 10 mm e a duração desta chuva poderá ser qualquer, desde que permita o traçado dos trechos de ascensão e decaimento do hidrograma, com precisão razoável.

Os três princípios da teoria deste método são:

1º) *Constância do tempo de base*: Em uma dada bacia hidrográfica, o tempo de duração do escoamento superficial é constante para chuvas de igual duração;

2º) Proporcionalidade das descargas: Duas chuvas de igual duração, produzindo volumes diferentes de escoamento superficial, dão origem a fluviogramas em que as ordenadas, em tempos correspondentes, são proporcionais aos volumes totais escoados;

3º) Aditividade dos eventos: A distribuição, no tempo, do escoamento superficial de determinada precipitação, independe de precipitações anteriores, o que implica em se poder realizar sobreposição de soluções.

O hidrograma unitário de uma bacia pode ser determinado pela análise de dados de precipitação e vazão ou por meio de fórmulas empíricas, quando são chamados de hidrogramas sintéticos. Nos itens a seguir serão detalhados dois métodos de hidrógrafas unitárias sintéticas: a de Snyder e a Triângular ou Adimensional Sintética do SCS.

A obtenção do hidrograma unitário por meio de dados de precipitação e vazão pode ainda ser dividida em dois casos: evento simples e evento complexo. O evento é simples quando apenas um intervalo de precipitação gera o escoamento superficial, e é complexo quando mais de um intervalo de precipitação gera escoamento. Para o segundo caso, pode-se consultar o trabalho de Tucci (2008).

Em eventos simples, a geração do hidrograma unitário pode ser obtida pela rotina a seguir, considerando que existam registros (precipitação e vazão) extremos com duração menor ou igual ao intervalo de tempo escolhido e com distribuição temporal uniforme da precipitação. A sequência pode ser realizada da seguinte forma:

a) Separam-se os escoamentos em superficial e subterrâneo por meio de um dos vários métodos existentes (por exemplo: Linsley et al., 1975), obtendo assim a precipitação efetiva e as ordenadas do hidrograma de escoamento superficial.

b) Estima-se a lâmina escoada, em mm, a partir da conversão das vazões em volumes e a partir destes convertidos para lâmina (mm). Calcula-se o coeficiente de escoamento (C) pela divisão da lâmina escoada pela lâmina precipitada.

c) Distribui-se a lâmina efetiva pela unidade básica, 10mm, e obtêm-se o volume do hidrograma unitário e suas ordenadas.

A conversão do hidrograma unitário para diferentes durações de precipitação é feita realizando-se uma convolução dos valores das ordenadas do hidrograma unitário para os valores de lâminas dos blocos da distribuição temporal da chuva de interesse (Capítulo 2).

Exemplo 3.7

Calcular Q_p para uma chuva de projeto de 210 mm e tempo de concentração de 8 horas, supondo os seguintes dados:

$A = 5.000$ ha;

$t_c = 8$ horas;

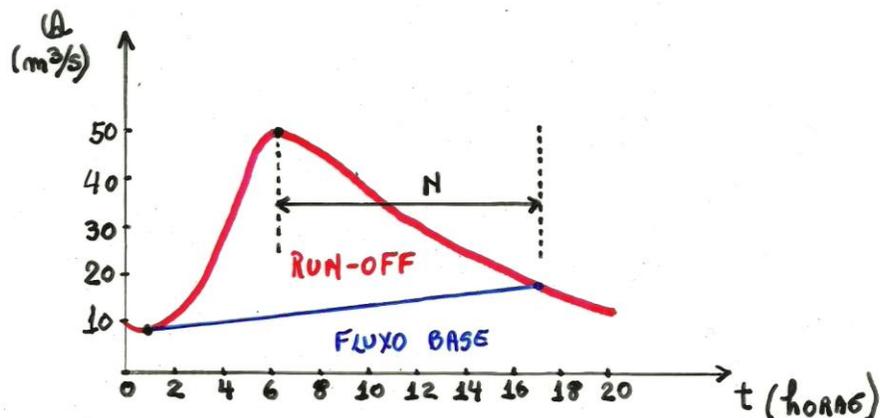
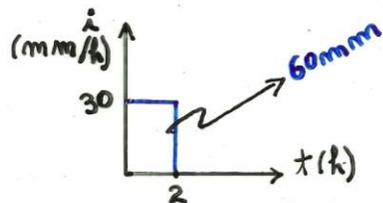
duração da precipitação medida = 2 horas;

precipitação medida = 60mm;

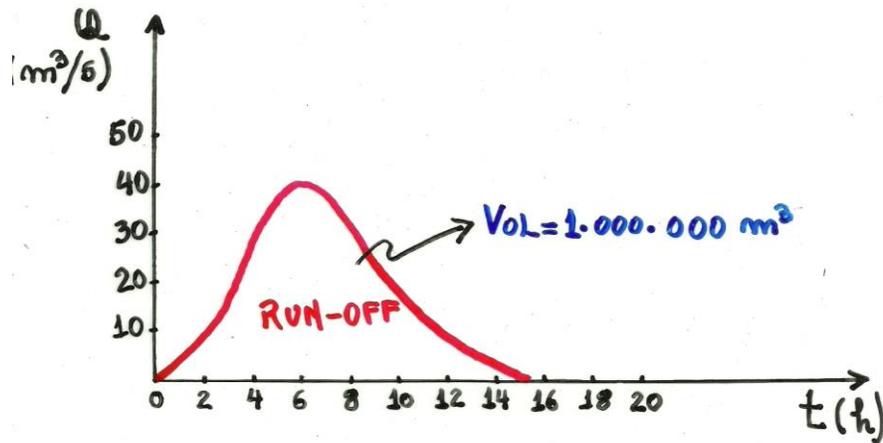
hidrógrafa medida (na Figura a seguir)

Solução:

1) Separação do escoamento em superficial e subterrâneo:



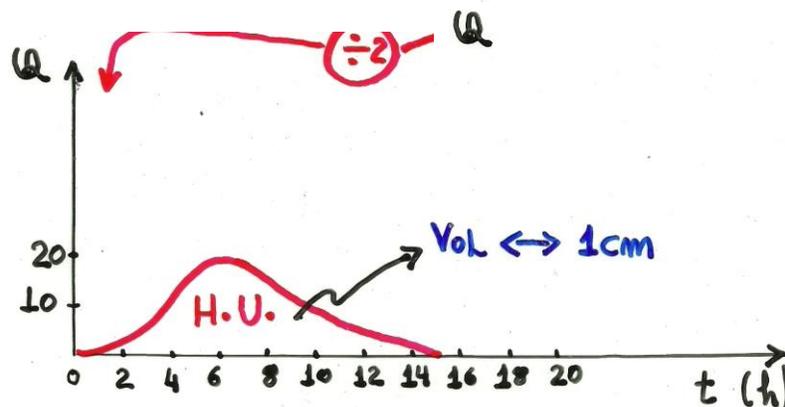
2) Cálculo do volume escoado, da lâmina escoada e do coeficiente de escoamento (C):



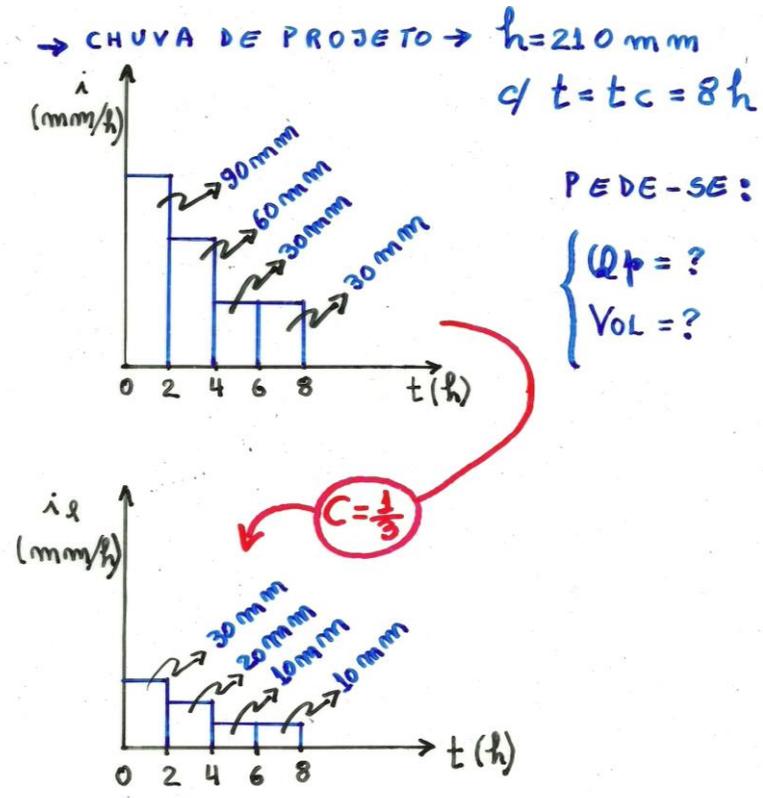
$$he = \frac{1.000.000,0\text{m}^3}{50.000.000,0\text{m}^2} = 0,02\text{m} = 2\text{cm} = 20\text{mm}$$

$$c = \frac{he}{h} = \frac{20\text{mm}}{60\text{mm}} = \frac{1}{3} = 0,33$$

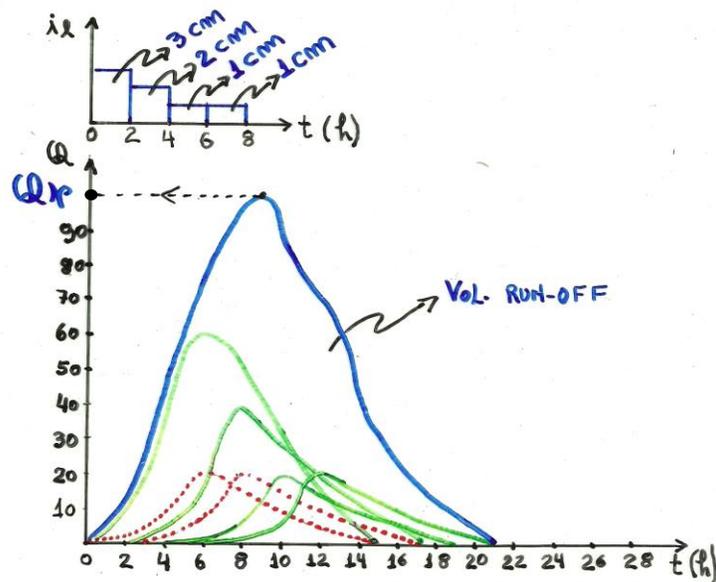
3) Obtenção do hidrograma unitário e das suas ordenadas, dividindo o hidrograma do escoamento superficial pela lâmina escoada em cm.



4) Obtenção dos blocos de distribuição temporal da precipitação total e da precipitação efetiva:



5) Multiplicação da lâmina de precipitação efetiva (cm) de cada bloco pelas ordenadas do hidrograma unitário e realização da convolução (somatória de hidrogramas defasados)



3.7-Métodos de Hidrógrafas Unitárias Sintéticas

Hidrógrafas Unitárias Sintéticas são métodos que determinam a forma do hidrograma e, portanto, a vazão de pico, a partir de parâmetros relacionados com as características físicas da bacia. O parâmetro mais importante neste caso é o tempo de retardamento t_p (ou o seu assemelhado, o tempo de ascensão t_a), que sintetiza os efeitos das características físicas da bacia sobre o hidrograma de chuva excedente. Os efeitos de armazenamento afetam a duração do escoamento superficial direto (tempo de base, t_b). O valor de t_b é geralmente expresso em função de t_a .

Assim como no exemplo anterior, as vazões estimadas pelos métodos sintéticos se referem a uma lâmina escoada de 1 cm que, para ser aplicada a um evento de interesse, necessitam da convolução para estimar a vazão máxima.

O número de métodos existentes é muito grande, podendo ser citados os estudos de Bernard, McCarthy, Snyder, Clark, Taylor e Schwarz, Commons, U.S. Soil Conservation Service, Mitchell, Getty e McHughs, Dooge, Warnock, entre vários outros. A seguir serão apresentados alguns métodos utilizados.

3.7.1-Hidrógrafa Unitária Sintética de Snyder

Segundo Pinto et al. (1976), os estudos de Snyder são uns dos pioneiros; datam de 1938 e baseiam-se em observações realizadas em rios na região montanhosa dos Apalaches, nos E.U.A. O método consiste na determinação dos seguintes fatores apresentados e que atendem ao esquema da Figura 3.6:

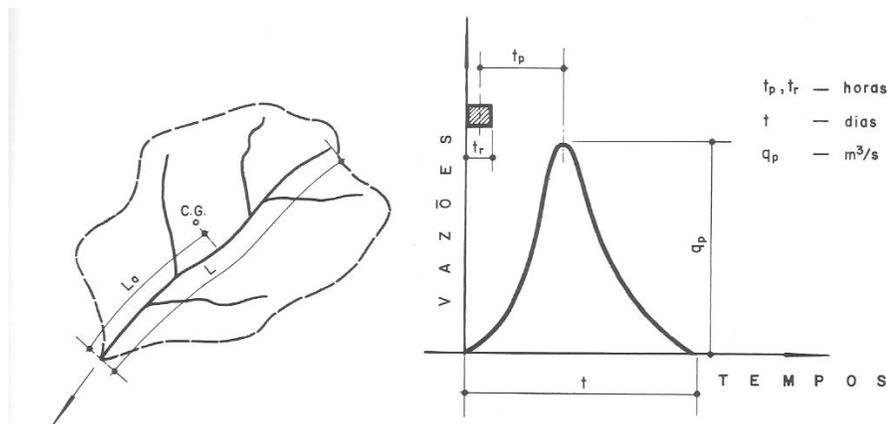


Figura 3.6 – Representação gráfica dos fatores do método de Snyder.

- tempo de pico: $t_p = \frac{C_t}{1,33} (L.L_a)^{0,3}$ **equação 3.19**

Em que:

tp - tempo de pico, que é definido como o tempo entre o centro de massa da precipitação efetiva e o pico do hidrograma, horas;

L - comprimento do rio principal, medido ao longo do curso principal, km;

La - a distância da seção principal ao ponto do rio mais próximo ao centro de gravidade da bacia, medida ao longo do curso principal, km;

Ct - coeficiente numérico, geralmente, variável entre 1,8 e 2,2. Para obtenção do valor a ser utilizado é necessária a validação com dados de precipitação e vazão registrados;

- tempo de duração da precipitação: $t_r = \frac{t_p}{5,5}$ **equação 3.20**

Em que:

tr - tempo de duração da precipitação, horas;

- vazão máxima (1cm): $Q_p = \frac{2,76.C_p.A}{t_p}$ **equação 3.21**

Em que:

Qp - vazão estimada para uma lâmina de 1cm, m³/s;

Cp - coeficiente numérico, geralmente variável entre 0,56 e 0,69. Para obtenção do valor a ser utilizado é necessária a validação com dados de precipitação e vazão registrados;

A - área da bacia, km²;

- tempo de base t: $t_b = 3 + 3 \left(\frac{t_p}{24} \right)$ **equação 3.22**

Em que:

tb - tempo de base, dias;

Quando se consideram precipitações com duração t_R superior ao tempo calculado na Fórmula 3.23, o valor de t_p da equação 3.24 deve ser substituído por t'_p :

- tempo de pico corrigido: $t'_p = t_p + \frac{t_R - t_r}{4}$

equação 3.23

Em que:

t'p - tempo de pico corrigido, horas;

tp - tempo de pico calculado na equação 3.22, horas;

tR - tempo de duração medido, horas;

tr - tempo de duração calculado pela equação 3.23, horas.

Obtidos os valores t_p , Q_p e t , a hidrógrafa unitária pode ser desenhada a sentimento, com cuidado de se manter a unidade da lâmina escoada em 1 cm.

Este método requer uma grande experiência do engenheiro e também a validação com dados registrados (PIO, 1999); por isso, não está entre os mais utilizados atualmente.

3.7.2-Hidrógrafas Unitárias Triangular Sintética e Adimensional Sintética do Soil Conservation Service (SCS)

O hidrograma sintético do SCS, proposto no National Engineering Handbook (1985), é um hidrograma adimensional resultante da análise de um grande número de bacias nos Estados Unidos. Os principais parâmetros deste hidrograma são obtidos de uma hidrógrafa triangular em que o tempo de base é definido em função do tempo de pico. Estes parâmetros e a vazão máxima (1cm) podem ser utilizados com a hidrógrafa neste formato (método da Hidrografa Triangular Sintética do SCS) ou no formato adimensional (método da Hidrógrafa Adimensional Sintética do SCS ou “método do SCS”). A Figura 3.7 e a Tabela 3.5 ilustram as duas hidrógrafas, onde se verifica que o eixo dos tempos é expresso em frações de t_p e o eixo das vazões em frações da vazão máxima Q_p .

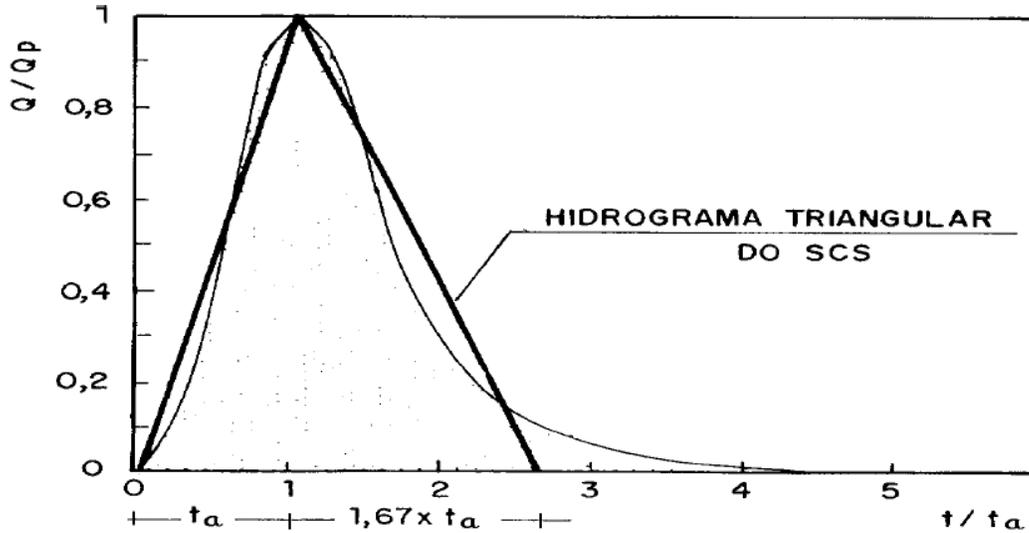


Figura 3.7 – Representação gráfica dos hidrograma adimensional e do triangular do SCS.

Tabela 3.7 – Valores do hidrograma adimensional do SCS.

t/tp	Q/Qp								
0.0	0.0000	1.0	1.0000	2.0	0.2800	3.0	0.0550	4.0	0.0110
0.1	0.0300	1.1	0.9900	2.1	0.2435	3.1	0.0475	4.1	0.0098
0.2	0.1000	1.2	0.9300	2.2	0.2070	3.2	0.0400	4.2	0.0086
0.3	0.1900	1.3	0.8600	2.3	0.1770	3.3	0.0345	4.3	0.0074
0.4	0.3100	1.4	0.7800	2.4	0.1470	3.4	0.0290	4.4	0.0062
0.5	0.4700	1.5	0.6800	2.5	0.1270	3.5	0.0250	4.5	0.0050
0.6	0.6600	1.6	0.5600	2.6	0.1070	3.6	0.0210	4.6	0.0040
0.7	0.8200	1.7	0.4600	2.7	0.0920	3.7	0.0180	4.7	0.0030
0.8	0.9300	1.8	0.3900	2.8	0.0770	3.8	0.0150		
0.9	0.9900	1.9	0.3300	2.9	0.0660	3.9	0.0130		

Os parâmetros a serem calculados são:

- tempo de pico: $t_p = \frac{2}{3}t_c$ equação 3.24

Em que:

tp - tempo de pico, horas;

tc = tempo de concentração, horas;

- tempo de base: $t_b = 2,67t_p$ equação 3.25

Em que:

Tb = tempo de base, horas;

- vazão máxima (1cm): $Q_p = 3,125 \frac{A}{t_c}$

equação 3.26

Em que:

Q_p - vazão estimada para uma lâmina de 1cm, m³/s;

A - Área da bacia hidrográfica, km²;

Exemplo 3.8:

Utilizando os dados a seguir, calcular Q_p para uma chuva de projeto de 91,30mm:

A = 5.000 ha;

t_c = 8 horas;

Precipitação efetiva supondo 6 blocos com defasagem de 80min: 0,69mm; 3,15mm; 5,62mm; 67,13mm; 11,88mm; e 2,84mm.

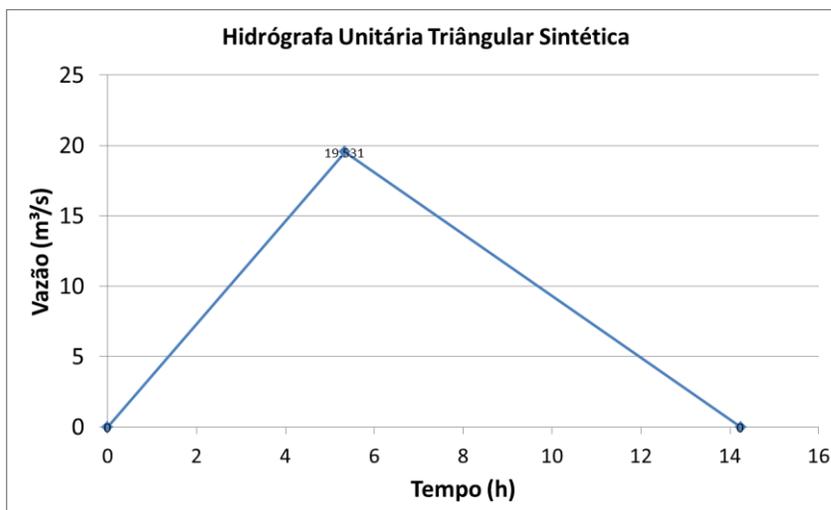
Solução:

1) Cálculo do t_p: $t_p = \frac{2}{3} t_c = \frac{2}{3} 8 = 5,33$ horas

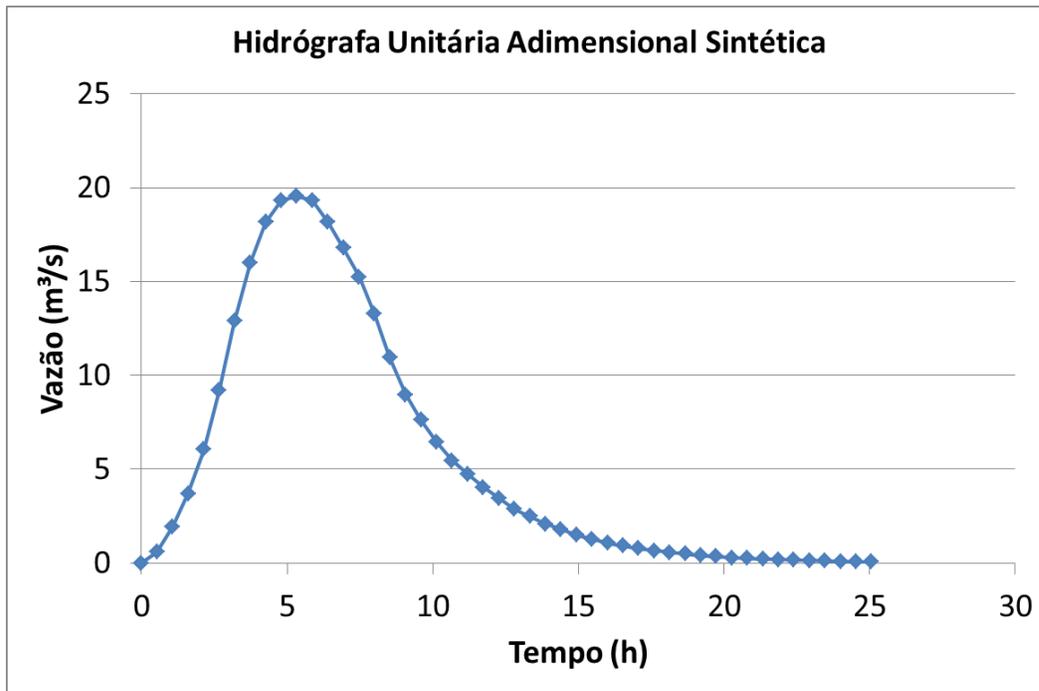
2) Cálculo do t_b: $t_b = 2,67 t_p = 2,67 * 5,33 = 14,24$ horas

3) Cálculo do Q_p (1 cm) = $Q_p = 3,125 \frac{A}{t_c} = 3,125 \frac{50}{8} = 19,531 m^3/s$

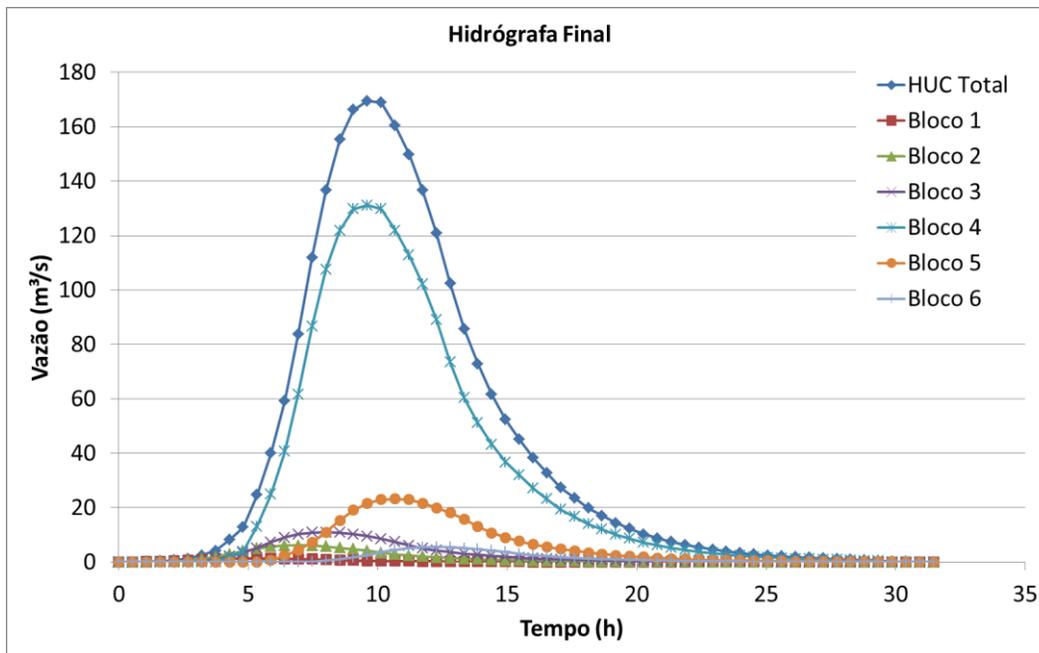
4) Gráfico da HU Triangular Sintética:



5) Gráfico da HU Adimensional Sintética:



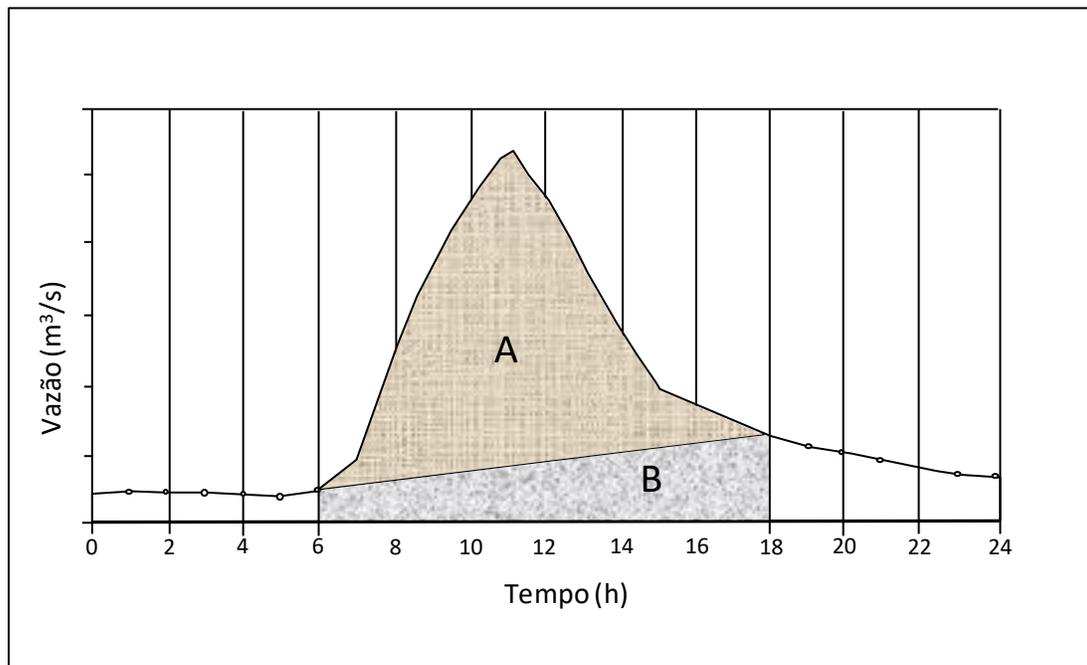
6) Convolução e obtenção da Hidrógrafa Final e da Vazão Máxima:



Vazão Máxima = 169,45 m³/s.

3.8-Exercícios propostos

a) A Figura abaixo representa um hidrograma de cheia, na saída de uma bacia de 200 km^2 de área de drenagem. Por planimetria, calculou-se que a sua parcela de escoamento superficial direto (Área A da Figura) equivale a $6.000.000 \text{ m}^3$. Considerando que a precipitação total média medida na bacia, responsável por esse evento, foi de 50 mm , calcule o valor do coeficiente C de escoamento superficial para a bacia em questão.



Resposta:

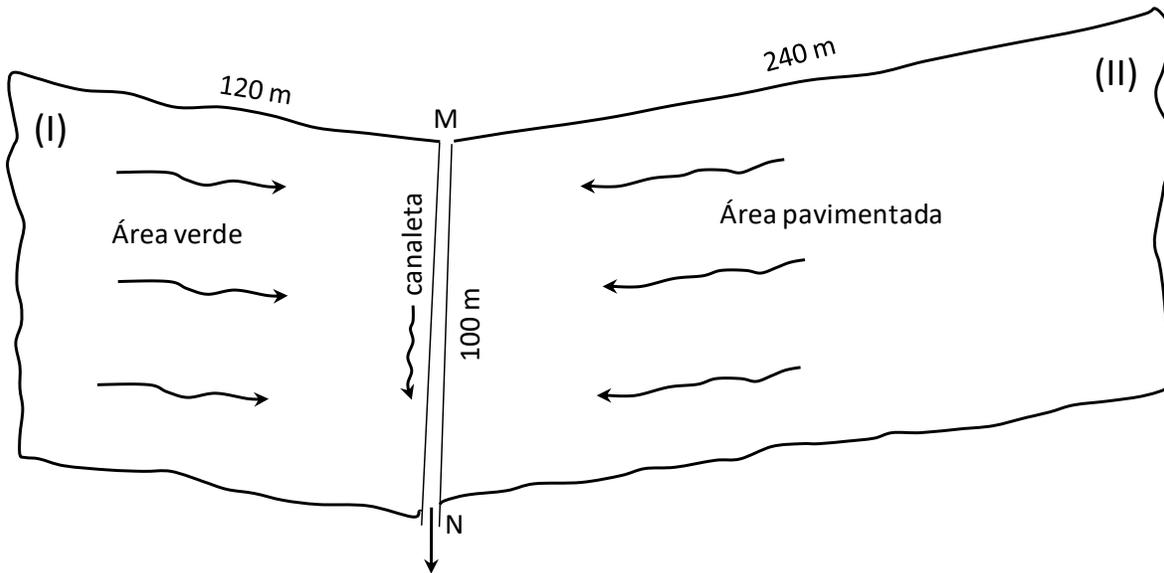
$$C = 0,60$$

b) Pretende-se dimensionar uma estrutura de controle no ponto N da Figura a seguir. Calcular o t_c até o ponto de saída N, sabendo-se que a área de contribuição é composta de duas parcelas (I) e (II) e uma canaleta MN.

Dados:

- (I) área verde com declive 4%; $V = 0,15 \sqrt{I}$
- (II) área pavimentada com declive 2%; $V = 0,60 \sqrt{I}$
- Canaleta com declive 1%; $V = 0,45 \sqrt{I}$

- Lembrar que I é dado em %, e que V em m/s.



Resposta: $t_c = 10,4$ minutos

c) Duas áreas em paralelo possuem as seguintes características:

Área A: $A=20$ ha; $C=0,40$; $t_c=30$ min

Área B: $A=30$ ha; $C=0,30$; $t_c=20$ min

Pede-se: calcular a vazão de pico pela Fórmula Racional para a saída em comum das áreas, utilizando um período de retorno de 10 anos. Utilize a relação intensidade-duração-

frequência de Piracicaba - SP, ou seja,

$$i = \frac{2017,05 \cdot T^{0,16}}{(t+21)^{0,91}} \quad (\text{lembrar que } t \text{ é dado em minutos, } T \text{ em anos e } i \text{ em mm/h})$$

Resposta: $Q_p = 3,846 \text{ m}^3/\text{s}$

d) Calcular Q_{\max} pelo método de I-Pai-Wú e comparar o resultado com o que seria obtido caso tivesse sido aplicado o Método Racional.

Dados:

- $A = 15.000$ ha
- $C = 0,30$
- $L = 20$ Km

- $I_{eq} = 3,2 \text{ m / km}$
- $T = 100 \text{ anos}$
- Usar a equação de chuva intensa do exercício anterior
- $Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{360}$ (lembrar que: $Q_p \rightarrow \text{m}^3/\text{s}$; $C \rightarrow$ adimensional; $i \rightarrow \text{mm}/\text{h}$; $A \rightarrow \text{ha}$)
- $Q_p = 0,278 \cdot C^* \cdot i \cdot A^{0,90} \cdot k$ (lembrar que: $A \Rightarrow \text{km}^2$; $i \Rightarrow \text{mm}/\text{h}$; $Q_p \Rightarrow \text{m}^3/\text{s}$)
- $C^* = \frac{\left(\frac{2}{1+F}\right)}{\left(\frac{4}{2+F}\right)} \times C$; $F = \frac{L}{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}$ (lembrar que $A \Rightarrow \text{km}^2$, $L \Rightarrow \text{km}$)
- $t_c = 57 \left(\frac{L^2}{I_{eq}}\right)^{0,385}$ (lembrar-se que $L \Rightarrow \text{km}$; $I_{eq} \Rightarrow \text{m} / \text{km}$; $t_c \Rightarrow \text{min}$)
- $k \Rightarrow$ Adimensional : gráfico da Figura 3.5
- Para I-Pai-Wú fazer $Q_{max} = 1,10 Q_p$; para Fórmula Racional considerar $Q_{max} = Q_p$

Resposta:

I – Pai – Wu $\rightarrow Q_{max} = 100,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Racional $\rightarrow Q_{max} = 232,88 \text{ m}^3/\text{s}$

e) Obtenha a hidrógrafa triangular sintética e demonstre que a mesma é unitária, sendo dados:

$A = 50 \text{ km}^2$;

$T_c = 8 \text{ horas}$.

f) Utilizando os dados a seguir, obter a hidrógrafa triangular sintética e calcular Q_p para uma chuva de projeto de 110,30mm:

$A = 5.000 \text{ ha}$;

$t_c = 8 \text{ horas}$;

Precipitação efetiva supondo 6 blocos com defasagem de 80min: 1,19mm; 4,52mm; 7,77mm; 76,98mm; 16,04mm; e 3,78mm.

Resposta = 270,55 m³/s.