

Capítulo 24

Método Santa Bárbara

“A verdadeira amizade somente existe entre aqueles que desejam aprender, ou para seu prazer ou para ganhar melhor entendimento do mundo”
Marsílio Ficino, Academia Platônica de Florença

SUMÁRIO

Ordem	Assunto
24.1	Introdução
24.2	Conceitos de translação e armazenamento
24.2.1	Translação
24.2.2	Armazenamento
24.3	Obtenção da hidrograma conforme método Santa Bárbara
24.4	Definição da chuva de projeto

19 páginas

Capítulo 24 –Método Santa Bárbara (A 50km²)

24.1 Introdução

O objetivo do método Santa Bárbara é obter o hidrograma de uma precipitação para uma determinada bacia considerando um local escolhido. No hidrograma teremos a vazão de pico e as vazões em intervalo de tempo o que facilitará o routing do reservatório, caso tenhamos um piscinão.

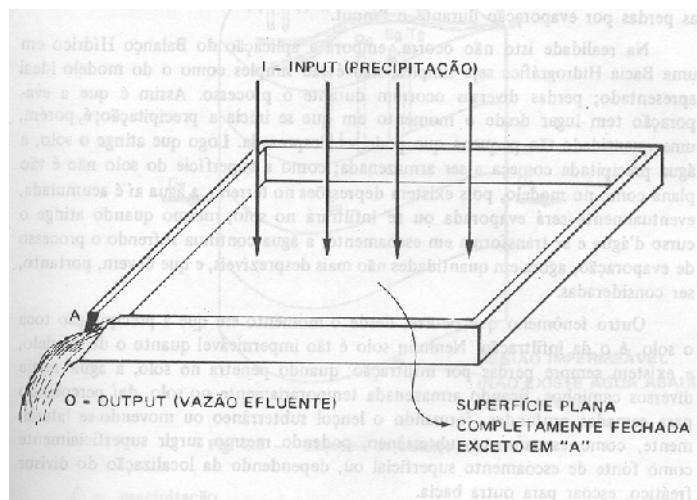


Figura 24.1- Modelo de sistema hidrológico simples

Fonte: Swami Marcondes Villela e Arthur Mattos, 1975 p. 7

Vamos supor uma bacia conforme a Figura (24.1) na qual temos uma precipitação. Se tomarmos o ponto A como seção de controle, poderemos observar o seguinte. No começo da precipitação a vazão é nula.

Com o passar do tempo a vazão no ponto A vai aumentando cada vez mais até chegar a um pico e daí começa a diminuir até atingir a vazão zero novamente. A chuva parou mas a vazão ainda continua até a mesma ficar zero.

Esta curva é a hidrograma ou hidrograma que queremos, conforme Figura (24.2). Teremos a vazão de contribuição da água de chuva na bacia em função do tempo.

A parte da chuva que evapora, que fica presa em forma de poça d'água ou se infiltra no solo, não nos interessa. Interessa somente a chuva que produz as enxurradas, que é chamada de chuva excedente ou runoff.

Na hidrograma da Figura (24.2) vemos que a vazão atinge o pico de 43 m³/s e a 150 min ou seja 2,5h a mesma chega a zero novamente.

A chuva que causou aquele hidrograma varia também com o tempo e chama-se hietograma. Observar empiricamente que quanto mais impermeável for a bacia maior será o pico de vazão na hidrograma da Figura (24.2) e quanto maior for o tamanho da bacia maior também será o pico. No Capítulo 2 temos vários exemplos de hietogramas para a cidade de São Paulo.

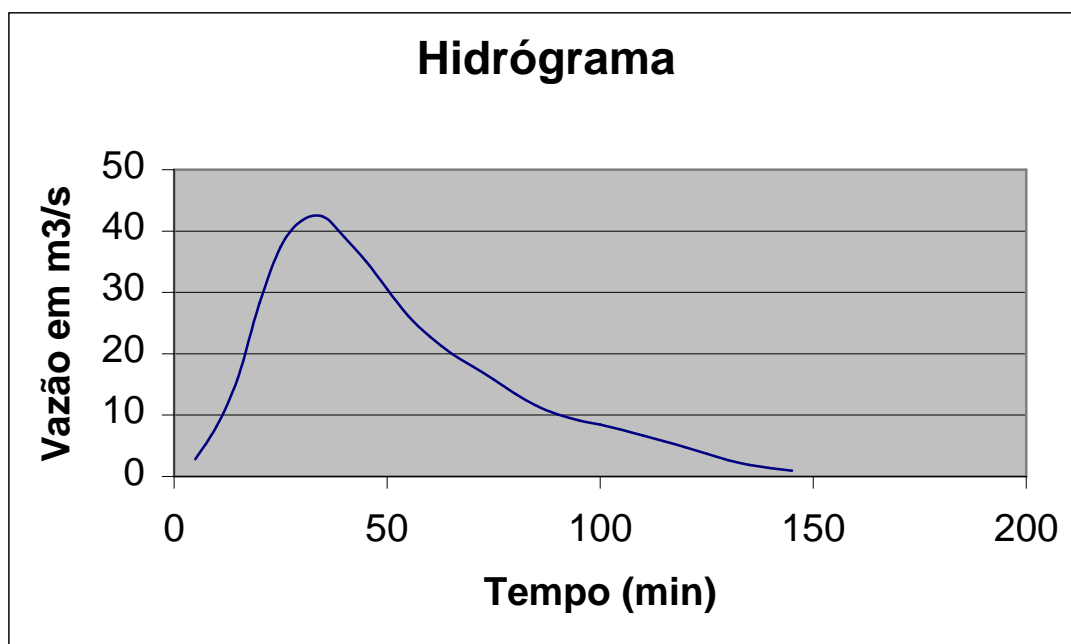


Figura 24.2- Hidrograma da bacia no ponto A

24.2 Conceitos de translação e armazenamento

É muito importante o conceito de translação e armazenamento para o estudo de escoamento em canais, reservatórios e bacias hidrográficas.

24.2.1 Translação

É o movimento da água ao longo dos canais em direção paralela ao fundo. Tempo de translação é, portanto, o tempo que uma partícula de água leva para percorrer uma determinada distância.

Tempo de concentração é o tempo de translação do ponto mais distante da bacia até a seção de controle (Porto,1995 p. 139).

24.2.2 Armazenamento

Pode ser interpretado como o movimento da água na direção perpendicular ao fundo do canal e representa, portanto, a parcela da chuva excedente que fica, temporariamente, retida na bacia e que chegará à seção de controle com certo atraso (Porto,1995 p. 139).

A grande importância do método Santa Bárbara é que considera o efeito do armazenamento.

Outro fator importante do método Santa Bárbara é que leva em conta as áreas de impermeabilização. Isto foi muito bem salientado por Porto,1995, pois a medida que o solo se impermeabiliza, as perdas tornam-se menos sensíveis à infiltração e dependerão mais da parte impermeável da bacia. As tabelas de uso do solo costumam ser muito gerais e imprecisas, enquanto que a estimativa da área impermeabilizada poderá ser feita com maior precisão por meio de fotografias aéreas, por exemplo (Porto,1995 p.163).

24.3 Obtenção do hidrograma conforme método Santa Bárbara

Segundo Akan, 1993 o *Santa Barbara Urban Hydrograph Method* (SBUH) foi primeiramente desenvolvido por James M. Stubchaer funcionário do órgão responsável pelo controle das inundações e conservação da água do Distrito de Santa Bárbara na Califórnia no ano de 1975.

O método foi desenvolvido para ser usado com microcomputador usando planilha Excel da Microsoft, por exemplo, mas pode ser feito manualmente. Foi apresentado pela primeira vez no Simpósio Nacional de Hidrologia Urbana e Controle de Sedimentos feito na Universidade de Kentucky em 1975 (Wanielista, 1997) e em comparação com outros métodos é de fácil aplicação e aparentemente preciso.

O método Santa Bárbara admite que a área impermeável da bacia é diretamente conectada ao sistema de drenagem e que são desprezíveis as perdas de água da chuva que caem na área impermeável ou a chuva excedente que vai pela superfície.

Dica: o método Santa Bárbara é aplicável em áreas urbanas.

Dica: a área máxima a ser aplicado o Metodo Santa Barbara é 50 km².

O método Santa Barbara combina o *runoff* sobre área impermeável e sobre a área permeável para formar o hidrograma. O hidrograma é obtido supondo um reservatório imaginário cujo tempo de espera é o tempo de concentração da bacia.

O *runoff* também é chamado de *chuva excedente* (ou chuva efetiva) que é o volume de água de chuva que se escoará superficialmente pela bacia.

Existem quatro métodos principais para a determinação do *runoff*, ou seja, da *chuva excedente*. Nestes métodos determinamos a parcela da precipitação de chuva que se infiltra no solo quando o mesmo é permeável.

O primeiro é o método do número da curva (CN) adotado pelo *Soil Conservation Service* do Departamento da Agricultura dos Estados Unidos (SCS).

O segundo é método de *Horton* com razão de infiltração variável e específica do local e está explicado no Capítulo 8 deste livro.

O terceiro é o método da infiltração constante e o quarto o método do balanço das massas.

Os mais usados são o método do número da curva CN do SCS e o método de *Horton*.

Dica: deve ser usado o método do número da curva CN do SCS para a área permeável para achar a chuva excedente.

As ordenadas “I “ da hidrograma devem ser calculadas com unidades consistentes, para se evitar erros. No caso iremos adotar as unidades do Sistema Internacional (SI).

$$I = [i \cdot d + i_e \cdot (1.0 - d)] \cdot A \quad \text{(Equação 24.1)}$$

Sendo:

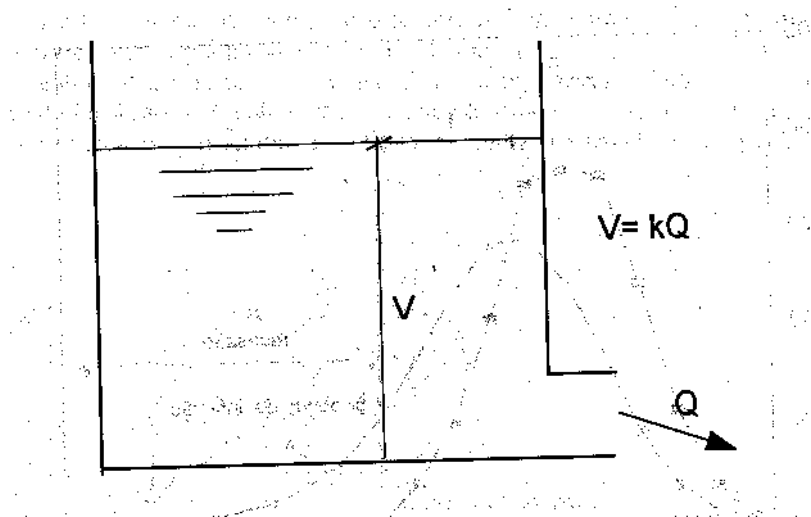
I= entrada para o reservatório imaginário. São as ordenada da hidrograma em m³/s.

i= precipitação total da chuva no intervalo Δt em m/s. Na área impermeabilizada é o runoff;

i_e= escoamento da chuva excedente (runoff) na área permeável no intervalo Δt em m/s;

d = fração da área impermeável em relação a área total;
 A = área total de drenagem em m^2 .

O runoff da hidrograma $Q_{(j)}$ da saída do reservatório pode ser obtido usando o método denominado “routing” para a hidrograma instantânea $I_{(j-1)}$ e $I_{(j)}$ através do reservatório linear imaginário com a constante de armazenamento usando o tempo de concentração t_c na bacia.



Nesse reservatório o volume V é proporcional a vazão Q elevado ao expoente m .

$$V = k \cdot Q^m$$

O valor de m varia de 0,9 a 1,2. No caso do método Santa Bárbara supomos que $m=1$, isto é, que a função é linear.

$$V = k \cdot Q$$

Em um intervalo de tempo Δt temos:

$$V_2 - V_1 = k \cdot (Q_2 - Q_1)$$

$$\text{Como } V_2 - V_1 = [(I_1 + I_2)/2] \Delta t - [(Q_2 - Q_1)/2] \Delta t$$

Eliminando-se $V_2 - V_1$ e isolando-se Q_2 temos:

$$Q_2 = Q_1 + C \cdot (I_1 + I_2 - 2 \cdot Q_1)$$

$$\text{Sendo } C = \Delta t / (2 \cdot k + \Delta t)$$

Como a nossa hipótese é que $k=t_c$ teremos

$$C = \Delta t / (2 \cdot t_c + \Delta t)$$

Sendo C chamado de coeficiente de retardo e representado normalmente por K_r .

$$K_r = \Delta t / (2 \cdot t_c + \Delta t) \quad \text{(Equação 24.2)}$$

Pode ser escrito o seguinte:

$$Q_{(j)} = Q_{(j-1)} + K_r \cdot (I_{(j-1)} + I_{(j)} - 2 \cdot Q_{(j-1)}) \quad \text{(Equação 24.3)}$$

sendo:

t_c = tempo de concentração em segundos;

Δt = intervalo de tempo em segundos;

K_r = coeficiente de retardo (número adimensional).

24.4 Definição da chuva de projeto

Um dos parâmetros importante é a definição da chuva de projeto. Existem vários métodos e devem ser utilizados de maneira sensata e reconhecer o limite da informação (Urbanas e Staher, 1992 *in* Canholi, 1995).

Existem diversos procedimentos a determinação da chuva de projeto: bloco de tormenta, métodos de Sifalda e Arnell, método de Chicago (Keifer & Chu) e método dos blocos alternados (citado por Zahed & Marcelini), hietograma triangular (Yen & Chow) e método de Pilgrim & Cordery).

Dica: adotei o método do bloco de tormenta para determinação da chuva de projeto.

Vamos adotar o *método do bloco da tormenta padronizada*, escolhendo para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), a tormenta de 2 de fevereiro de 1983.

O *hietograma*, isto é, a precipitação no tempo é da chuva de 1983 que é coincidente com o hidrograma de Huff com 50% de probabilidade e para o 1º quartil. Este mesmo hietograma com duas horas precipitação foi usado pelo DAEE de São Paulo no estudo Hidrológico do córrego Pirajussara (72km²), córrego dos Meninos (afluente do Rio Tamanduatéi) e no rio Aricanduva.

Para o rio Tietê entre a barragem Edgard de Souza e barragem da Penha foi usada chuva de 24 horas de 02/02/1983 e com a curva de Huff com 50% de probabilidade e 1º quartil.

Exemplo 24.1- Calcular a vazão de pico e a hidrograma usando o método Santa Bárbara de uma área urbana em Guarulhos com área de 1,12km² (112ha) para período de retorno de 50 anos, hietograma de Huff 1º quartil com 50% de probabilidade e equação da chuva de Martinez e Magni, 1999. Os intervalos são de 10min.

Usando uma planta aerofotogramétrica do local foram levantados os seguintes elementos:

Tabela 24.1- Dados obtidos em planta aerofotogramétrica da área local

Trecho	Cota Montante	Cota jusante	Comprimento	Declividade
	(m)	(m)	(m)	(m/m)
1	805	762,9	300	0,14033
2	762,9	758,8	100	0,04100
3	758,8	744,8	295	0,04746
4	744,8	734,5	395	0,02608
5	734,5	734,2	100	0,00300
6	734,2	731,2	80	0,03750
7	731,2	726,6	380	0,01211
			1650m	
			Declividade média =0,047515m/m	

O ponto mais alto está na cota 805m e o mais baixo na cota 726,6m. O comprimento total do talvegue é de 1650m.

Os trechos, as cotas a montante e a jusante bem como os comprimentos e declividades estão na Tabela (24.2). A declividade média do talvegue é 0,047515m/m.

Para o cálculo do tempo de concentração t_c , foram verificados vários métodos, tais como, Califórnia Culverts Practice, Método de Kirpich, Método cinemático, Método da Fórmula SCS Lag- 1975 usando $CN=90$ e foram obtidos os resultados da Tabela (24.2).

Tabela 24.2- Tempo de concentração obtido através de vários métodos

Método para obter o tempo de concentração	Tempo de concentração (minutos)
Tc pelo método Califórnia Culverts Practice=	46,7
Tempo de concentração em minutos por Kirpich=	37,2
Tc pelo método Cinemático=	29,5
Tempo de concentração por Formula SCS Lag 1975=	44,6
Tempo de concentração médio =	39,5min
Tempo de concentração médio =	2370 segundos

Adotamos para o tempo de concentração o valor médio $t_c=39,5\text{min} = 2370\text{segundos}$
 Conforme levantamento de campo, a área impermeável calculada estimada é de 61,5% para o horizonte de projeto de 20 anos.

Como trata-se de área de lotes residenciais menores que 500m^2 e sendo o solo tipo C conforme outros levantamentos já efetuados na região, verificando-se no Capítulo 7 deste livro a Tabela (7.4) encontramos o valor $CN=90$, o qual será adotado.

Procederemos o cálculo do método Santa Bárbara conforme Akan,1993- *The Santa Barbara Urban Hydrograph Method*, p. 103 que usaremos como modelo.

Valor de Δt

Sendo a chuva de 2h e com 12 intervalos o valor de Δt será igual a 600s.

$$\Delta t = 2 \text{ h} / 12 = 0,16666\text{h} = 600\text{s} = 10\text{min}$$

Segundo Larry Mays temos: $t_c/5 \Delta t \quad t_c/3$

Valor do coeficiente de retardo K_r

Conforme Equação (24.2)

$$K_r = \Delta t / (2 \cdot t_c + \Delta t)$$

O valor de K_r usando unidades coerentes, por exemplo, tudo segundos ou tudo hora. No caso usaremos segundos.

$$K_r = 600 / (2 \times 2370 + 600) = 0,11235955$$

Vamos explicar em detalhes como se constrói a Tabela (24.3) com 15 colunas.

Coluna 1:

Trata-se da ordem de 1 até 12.

Coluna 2:

Contagem de tempo até 10min na primeira linha, de 10min a 20min na segunda linha e assim por diante, até 120min ou seja as 2h de chuva que admitimos.

Coluna 3:

Nesta coluna o tempo está em horas.

Coluna 4:

Conforme foi verificado pelo Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo, a chuva de 2 de fevereiro de 1983 praticamente coincide com o hietograma de chuva de Huff para o primeiro quartil e com 50% de probabilidade. Daí usarmos na Região Metropolitana de São Paulo a chamada chuva de Huff 1Q 50% P. No caso temos a fração da chuva devendo o total ser igual a 1 (um).

Coluna 5:

Considerando a Equação da Chuva de São Paulo elaborada por Martinez e Magni, 1999 e usando período de retorno de 50anos, achamos no Capítulo 2 a precipitação total de 94,6mm. Todos os valores da coluna 5 são obtidos da multiplicação de 94,6mm pela fração da chuva de Huff da coluna 4.

Assim multiplicando $0,132 \times 94,6\text{mm} = 12,4\text{mm}$ e assim por diante.

Coluna 6:

Na coluna 6 estão a precipitação acumulada. Repete-se a primeira linha 12,5mm e soma-se esta a linha 2 da coluna 5 da seguinte maneira:

$$12,5\text{mm} + 25,9\text{mm} = 38,4\text{mm}$$

Assim obteremos toda a coluna 6, sendo que na linha de ordem 12 teremos que ter o total de 94,6mm para conferir.

Coluna 7:

Na coluna 7 vamos calcular a chuva excedente pelo método do número da curva CN do SCS.

O valor de CN =90 é dado fornecido pelo problema e deve-se somente a área permeável. Temos que obter o valor do potencial máximo de retenção após começar o runoff, ou seja, o valor S em milímetros conforme Equação (7.6).

$$\text{O valor de } S = 25400 / (CN - 254) = 28,22\text{mm}$$

A abstração inicial Ia em milímetros será conforme Equação (7.4)

$$I_a = 0,2 \cdot S = 0,2 \times 28,22 = 5,64\text{mm}$$

Temos que usamos a equação para calcular o valor da chuva excedente Q.

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)}$$

A equação da chuva excedente Q só é válida quando $P > 0,2 S$ ou seja $P > 5,64\text{mm}$.

Vamos montar a equação de Q, calculando o valor de $0,8S = 0,8 \times 28,22 = 22,58\text{mm}$
Teremos então:

$$Q = \frac{(P - 5,64)^2}{(P + 22,58)} \quad (\text{Equação 24.4})$$

A Equação (24.4) é que será usada para se obter a coluna 7 juntamente com a restrição de que P deverá ser maior que 5,64mm ou seja $P > 5,64\text{mm}$. Caso o P seja menor que 5,64mm então o valor de Q será 0, ou seja: Se $P < 5,64\text{mm}$ então $Q = 0$.

Isto é feito em planilha Excel usando a função SE.

$$= \text{SE}(\text{Coluna 5} > 5,64; [(\text{coluna 5} - 5,64)^2 / (\text{coluna 5} + 22,58)]; 0)$$

Para a primeira linha o valor de P da coluna 5 é 12,5mm, isto é, $P = 12,5\text{mm}$.

O valor de $P = 12,5\text{mm}$ é maior que 5,64mm, isto é, $P > 5,64\text{mm}$. Então se aplica a Equação (24.4) e fazendo-se a substituição teremos:

$$Q = \frac{(12,5 - 5,64)^2}{(12,5 + 22,58)} = 1,34$$

Desta maneira iremos obter toda a coluna 7 relativa a chuva excedente, sempre substituindo o valor de P corresponde a linha e na coluna 5.

A chuva excedente total é de 67,5mm. Esta chuva é que provocará o escoamento superficial, ou seja, o runoff.

Coluna 8

Como a coluna 7 obtida está a chuva excedente acumulada, para se obter a chuva excedente por faixa basta subtrair uma linha da frente pela anterior, repetindo-se a primeira linha. Para conferir a somatória deve ser de 67,5mm.

Coluna 9

A coluna 9 é a infiltração no solo. É calculada somente para sabermos quanto foi infiltrado no solo. É calculada pela diferença entre o precipitado por faixa na coluna 5 com a chuva excedente por faixa da coluna 8. Assim a infiltração na primeira linha da coluna 9 será:
 $12,5\text{mm} - 1,3\text{mm} = 11,2\text{mm}$.

A soma da infiltração da coluna 9 é de 27,1mm e somando-se a infiltração com a chuva excedente de 67,5mm tem que dar o total da chuva de 94,6mm. Notar que não foi considerada a evaporação, o que é usual para os problemas de drenagem.

Coluna 10

Um dos truques do método Santa Bárbara é a separação do escoamento superficial, sendo um sobre superfície impermeabilizada e outra sobre superfície permeável.

Assim na coluna 10 vamos calcular a velocidade de escoamento em milímetros por hora na região impermeabilizada. Assim cada linha da coluna 10 é obtida dividindo-se a precipitação por faixa pelo intervalo de tempo. No caso o intervalo de tempo deverá ser em horas, para se obter mm/h.

Na primeira linha da coluna 10 teremos: $12,5\text{mm} / 0,1666 = 74,9\text{mm/h}$.

Coluna 11

A coluna 11 é obtida usando o mesmo raciocínio da coluna 10, só que desta vez devemos tomar a chuva excedente, isto é, aquela que escorre, pois a outra parte da chuva foi infiltrada. Assim na primeira linha da coluna 8 achamos 1,34mm que deverá ser dividido pelo intervalo de tempo em horas que é 0,1666h. Teremos:
 $1,34\text{mm} / 0,1666\text{h} = 8,0\text{mm/h}$ e assim por diante.

Coluna 12

Tendo-se os valores do runoff na área impermeabilizada i e da área permeável i_e e usando a Equação (24.1), como possuímos os valores da área da bacia de drenagem A e da fração impermeável d , obtemos facilmente todos os valores das coordenadas da hidrograma para o reservatório imaginário.

$$I = [i \cdot d + i_e \cdot (1.0 - d)] \cdot A$$

Substituindo-se a fração da área impermeabilizada de 0,615 e área da bacia de drenagem 112ha e convertendo em metros quadrados, teremos:

$$I = [i \cdot 0,615 + i_e \cdot (1.0 - 0,615)] \cdot 112\text{ha} \times 10.000\text{m}^2$$

O valor de I obtido é em m^3/s é dependente dos valores da velocidade de escoamento superficial na área impermeável “ i ” e na área permeável “ i_e ”.

Para a primeira linha temos $i = 74,9\text{mm/h}$ e $i_e = 8,0\text{mm/h}$ sendo que não esquecendo de transformar as unidades de milímetros em metros e hora em segundos.

$$I = [74,9 / (1000 \times 3600) \cdot 0,615 + 8,0 / (1000 \times 3600) \cdot (1.0 - 0,615)] \cdot 1120000 = 15,29\text{m}^3/\text{s}$$

Desta maneira obtemos o valor de $15,29\text{m}^3/\text{s}$ que o valor de I para a primeira linha da coluna 12.

Coluna 13

A coluna 13 é a soma acumulada de duas linhas da coluna 12. Assim para a primeira linha da coluna 13 repete-se o valor de $15,29\text{m}^3/\text{s}$ da coluna 24. Para as demais linhas soma-se a linha anterior mais a atual ou seja $15,29\text{m}^3/\text{s} + 41,45\text{m}^3/\text{s}$ obtendo-se $56,74\text{m}^3/\text{s}$ e assim por diante.

Coluna 14

A coluna 14 é a aplicação da Equação (24.2)

$$Q_j = Q_{(j-1)} + K_r \cdot [I_{(j-1)} + I_{(j)} - 2 \cdot Q_{(j-1)}]$$

Temos o valor de $K_r =$

Conforme Equação (24.2)

$$K_r = \Delta t / (2 \cdot t_c + \Delta t)$$

O valor de K_r usando unidades coerentes, por exemplo, tudo segundos ou tudo hora. No caso usaremos segundos.

$$K_r = 600 / (2 \times 2370 + 600) = 0,11235955$$

Na Equação (24.2) temos o valor de K_r e os valores de $I_{(j-1)} + I_{(j)}$. Temos uma equação e duas incógnitas, mas uma incógnita será sempre a vazão anterior.

Supondo primeiramente que a vazão da primeira linha da coluna 14 seja zero, isto é, $Q_{(j-1)}=0$.

Substituindo teremos:

$$Q_j = 0 + 0,11235955 \cdot [15,29 - 2 \cdot 0] = 1,72 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para a segunda linha da coluna 14 temos:

$$Q_j = 1,72 + 0,11235955 \cdot [56,74 - 2 \cdot 1,72] = 7,71 \text{ m}^3/\text{s}$$

E assim por diante.

Coluna 15

É o hidrograma que queremos. Na primeira linha da coluna 15 é a segunda linha da coluna 14 e assim por diante.

Poderemos continuar os cálculos até atingirmos na coluna 15 o valor de $Q_{(j)}$ igual zero.

Obtemos a vazão de pico usando o método Santa Bárbara de $17,32 \text{ m}^3/\text{s}$ que ocorre a 40min do início da chuva, conforme se pode ver na linha de ordem 4.

Em se tratando de problema real, a vazão base é $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$ e que somada a vazão de pico de $17,32 \text{ m}^3/\text{s}$ nos dará a vazão de projeto de $18,15 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 24.3- Hidrograma de bacia urbana em Guarulhos usando o método Santa Bárbara para intervalo de 10min e período de retorno de 50anos

Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15
Ordem	Tempo	Tempo	HUFF 1. Q 50% P	Precip. Total P	Prec. Acum. P acum.	Chuva exc. acum. Q acum.	Chuva exc. por faixa Q	Infilt. f	Area imperme. i	Area perm. ie	I	I(1) + I(2)	Q(1)	Q(2)
	min	h	(%)	mm	mm	mm	mm	mm	mm/h	mm/h	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
1	10	0,17	0,132	12,5	12,5	1,34	1,34	11,2	74,9	8,0	15,29	15,29	0,00	1,72
2	20	0,33	0,274	25,9	38,4	17,6	16,3	9,7	155,5	97,6	41,45	56,74	1,72	7,71
3	30	0,50	0,208	19,7	58,1	34,1	16,5	3,2	118,1	98,9	34,44	75,89	7,71	14,50
4	40	0,67	0,116	11,0	69,1	43,9	9,8	1,2	65,8	58,7	19,63	54,07	14,50	17,32
5	50	0,83	0,071	6,7	75,8	50,0	6,1	0,6	40,3	36,7	12,11	31,75	17,32	16,99
6	60	1,00	0,053	5,0	80,8	54,6	4,6	0,4	30,1	27,7	9,08	21,19	16,99	15,56
7	70	1,17	0,046	4,4	85,1	58,7	4,0	0,3	26,1	24,2	7,90	16,98	15,56	13,97
8	80	1,33	0,028	2,6	87,8	61,1	2,5	0,2	15,9	14,8	4,82	12,72	13,97	12,26
9	90	1,50	0,024	2,3	90,1	63,3	2,1	0,1	13,6	12,7	4,13	8,95	12,26	10,51
10	100	1,67	0,024	2,3	92,3	65,4	2,1	0,1	13,6	12,8	4,14	8,27	10,51	9,08
11	110	1,83	0,016	1,5	93,8	66,8	1,4	0,1	9,1	8,5	2,76	6,90	9,08	7,81
12	120	2,00	0,008	0,8	94,6	67,5	0,7	0,0	4,5	4,3	1,38	4,14	7,81	6,52
			1,000	94,6			67,5	27,1						
			<i>Soma</i>	<i>Precip. Total</i>			<i>Chuva exc.</i>	<i>Infiltração</i>						

Fonte: Akan,1993- The Santa Barbara Urban Hydrograph Method, p. 103.

Exemplo 24.2- Aplicação do método Santa Bárbara para construção do hidrograma de área urbana em São Paulo –capital.

Local: piscinão do Pacaembu

Área da bacia = $A = 2,22 \text{ km}^2 = 222 \text{ ha} = 2,22 \times 1000 \times 1000 = 2.220.000 \text{ m}^2$

Tempo de concentração = $t_c = 0,25 \text{ h} = 15 \text{ min} = 15 \text{ min} \times 60 \text{ s} = 900 \text{ s}$

Fração impermeável = $d = 0,55$

Intervalos do hidrograma adotado: 48

Duração da chuva adotada = 2 horas

Intervalo em tempo do hidrograma = $48/2 \text{ h} = 0,04166 \text{ h} = 150 \text{ s}$

Precipitação de 2 horas escolhida para $T_r = 25 \text{ anos} = 85,1 \text{ mm}$ (Martinez e Magni, 1999)

Número da curva CN = 87

Na Tabela (24.4) temos 15 colunas. Vamos supor que as colunas 1 a 9 já foram calculadas e são dados do problema.

Queremos achar o hidrograma ou a hidrografia ou seja as vazões em m^3/s (coluna 15) em função do tempo.

Primeiramente vamos calcular o valor de K_r ou seja o número adimensional do coeficiente de retardo usando a Equação (24.3):

$$K_r = \Delta t / (2 \cdot t_c + \Delta t)$$

t_c = tempo de concentração em segundos = 900s;

Δt = intervalo de tempo em segundos = 150s;

$$K_r = 150 / (2 \times 900 + 150) = 0,076979878$$

Para calcular a Equação (24.1) temos que achar os valores do runoff na parte da área impermeabilizada que será a precipitação desprezando-se as perdas (**i**) e a parte do runoff da área permeável. Na área permeável uma parte da chuva se infiltra e não nos interessa no caso e outra parte faz parte do escoamento superficial, isto é, do runoff (**ie**).

Para se obter o valor de **i** referente a precipitação, divide-se o valor da coluna 6 e divide-se pelo intervalo de tempo de 0,04166h. Assim teremos para a linha de ordem 1 o seguinte:

$$2,6 / 0,04166 \text{ h} = 61,3 \text{ mm/h}$$

Na área permeável divide-se a coluna 8 dividir pelo intervalo de tempo de 0,04166h obtendo o seguinte:

$$0 / 0,04166 \text{ h} = 0 \text{ mm/h}$$

Tendo-se os valores do runoff na área impermeabilizada **i** e da área permeável **ie** e usando a Equação (24.1), como possuímos os valores da área da bacia de drenagem **A** e da fração impermeável **d**, obtemos facilmente todos os valores das coordenadas da hidrografia para o reservatório imaginário.

$$I = [i \cdot d + i_e \cdot (1.0 - d)] \cdot A$$

$$I = [i \cdot 0,55 + i_e \cdot (1.0 - 0,55)] \cdot 2220000$$

O valor de **I** obtido é em m^3/s .

Vamos agora aplicar a Equação (24.2)

$$Q_j = Q_{(j-1)} + K_r \cdot [I_{(j-1)} + I_{(j)} - 2 \cdot Q_{(j-1)}]$$

que irá calcular os valores de saída **Q_j** do reservatório imaginário da coluna 10.

Primeiramente calculemos a coluna 13. Observando a linha de ordem 4 vemos que o valor 43,53 é a soma de $I_{(j-1)} + I_{(j)} = 25,0 + 27,0,85=52,0$.

Calculemos a coluna 14 e a coluna 15.

Na coluna 14 o valor de $Q_{(j-1)}$ na linha de ordem 1 é zero.

Na Equação (24.2) temos o valor de $Q_{(j-1)} = 0$ e $I_{(j-1)} + I_{(j)}$ e o valor de $K_r = 0,076979878$ já calculado.

$$Q_j = Q_{(j-1)} + K_r \cdot [I_{(j-1)} + I_{(j)} - 2 \cdot Q_{(j-1)}]$$

Fazendo-se as substituições temos:

$$Q_j = 0 + 0,076979 \times [20,78 - 1 \times 0] = 1,60 \text{ m}^3/\text{s}$$

Na coluna 14 considerando a linha de ordem 2 o valor de $Q_{(j-1)}$ será $1,60 \text{ m}^3/\text{s}$. Calculemos o valor de Q_j . Substituindo na Equação (24.2) achamos o valor $Q_j = 4,55 \text{ m}^3/\text{s}$ e assim por diante, conforme mostra a Tabela (24.4).

A coluna 15 é o hidrograma que queremos. O pico do hidrograma é de $47,33 \text{ m}^3/\text{s}$ e consta da linha de ordem 13 e acontece 0,54 horas = 32,5 minutos

Tabela 24.4- Hidrograma da bacia do Pacaembu –SP usando o método Santa Bárbara

Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15
			HUFF 1. Q	Precip. Total P	Prec. Acum. P acum.	Chuva exc. acum. Q acum.	Chuva exc. por faixa Q	Infiltração f	Area impermeável i	Area permeável ie	I	I(1)+I(2)	Q(1)	Hidrogr ma Q(2)
Ordem	Tempo min	Tempo h	50% P (%)	mm	mm	mm	mm	mm	mm/h	mm/h	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
1	2,5	0,04	0,030	2,6	2,6	0,0	0,0	2,6	61,3	0,0	20,78	20,78	0,00	1,60
2	5,0	0,08	0,030	2,6	5,1	0,0	0,0	2,6	61,3	0,0	20,78	41,56	1,60	4,55
3	7,5	0,13	0,036	3,1	8,2	0,0	0,0	3,1	73,5	0,2	25,00	45,78	4,55	7,37
4	10,0	0,17	0,036	3,1	11,2	0,3	0,3	2,8	73,5	7,4	27,00	52,00	7,37	10,24
5	12,5	0,21	0,061	5,2	16,4	1,7	1,3	3,8	124,6	32,4	51,24	78,24	10,24	14,68
6	15,0	0,25	0,061	5,2	21,6	3,8	2,1	3,1	124,6	50,8	56,35	107,59	14,68	20,70
7	17,5	0,29	0,076	6,5	28,1	7,2	3,4	3,1	155,2	81,6	75,30	131,65	20,70	27,64
8	20,0	0,33	0,076	6,5	34,6	11,2	4,0	2,5	155,2	96,3	79,37	154,66	27,64	35,29
9	22,5	0,38	0,052	4,4	39,0	14,2	3,0	1,4	106,2	72,2	56,06	135,43	35,29	40,27
10	25,0	0,42	0,052	4,4	43,4	17,4	3,2	1,2	106,2	76,3	57,19	113,25	40,27	42,79
11	27,5	0,46	0,052	4,4	47,8	20,7	3,3	1,1	106,2	79,7	58,13	115,32	42,79	45,08
12	30,0	0,50	0,052	4,4	52,3	24,1	3,4	1,0	106,2	82,5	58,92	117,05	45,08	47,15
13	32,5	0,54	0,033	2,8	55,1	26,4	2,2	0,6	67,4	53,6	37,75	96,67	47,15	47,33
14	35,0	0,58	0,032	2,7	57,8	28,6	2,2	0,5	65,4	52,9	36,83	74,58	47,33	45,78
15	37,5	0,63	0,026	2,2	60,0	30,4	1,8	0,4	53,1	43,5	30,08	66,92	45,78	43,89
16	40,0	0,67	0,025	2,1	62,1	32,2	1,8	0,4	51,1	42,3	29,04	59,13	43,89	41,68
17	42,5	0,71	0,022	1,9	64,0	33,7	1,6	0,3	44,9	37,5	25,65	54,69	41,68	39,48
18	45,0	0,75	0,021	1,8	65,8	35,2	1,5	0,3	42,9	36,1	24,56	50,21	39,48	37,27
19	47,5	0,79	0,014	1,2	67,0	36,2	1,0	0,2	28,6	24,2	16,41	40,97	37,27	34,69
20	50,0	0,83	0,014	1,2	68,2	37,2	1,0	0,2	28,6	24,3	16,44	32,85	34,69	31,88
21	52,5	0,88	0,014	1,2	69,4	38,3	1,0	0,2	28,6	24,4	16,47	32,91	31,88	29,50
22	55,0	0,92	0,014	1,2	70,5	39,3	1,0	0,2	28,6	24,5	16,50	32,97	29,50	27,50
23	57,5	0,96	0,013	1,1	71,7	40,2	1,0	0,2	26,6	22,8	15,34	31,84	27,50	25,72
24	60,0	1,00	0,012	1,0	72,7	41,1	0,9	0,1	24,5	21,2	14,18	29,52	25,72	24,03
25	62,5	1,04	0,012	1,0	73,7	42,0	0,9	0,1	24,5	21,2	14,20	28,38	24,03	22,52
26	65,0	1,08	0,012	1,0	74,7	42,9	0,9	0,1	24,5	21,3	14,22	28,42	22,52	21,24
27	67,5	1,13	0,011	0,9	75,7	43,7	0,8	0,1	22,5	19,6	13,05	27,27	21,24	20,07
28	70,0	1,17	0,011	0,9	76,6	44,5	0,8	0,1	22,5	19,6	13,06	26,11	20,07	18,99
29	72,5	1,21	0,008	0,7	77,3	45,1	0,6	0,1	16,3	14,3	9,51	22,57	18,99	17,81
30	75,0	1,25	0,008	0,7	78,0	45,7	0,6	0,1	16,3	14,3	9,52	19,02	17,81	16,53

31	77,5	1,29	0,006	0,5	78,5	46,2	0,4	0,1	12,3	10,8	7,14	16,66	16,53	15,27
32	80,0	1,33	0,006	0,5	79,0	46,6	0,4	0,1	12,3	10,8	7,15	14,29	15,27	14,02
33	82,5	1,38	0,006	0,5	79,5	47,1	0,4	0,1	12,3	10,8	7,15	14,29	14,02	12,96
34	85,0	1,42	0,006	0,5	80,0	47,5	0,4	0,1	12,3	10,8	7,15	14,30	12,96	12,07
35	87,5	1,46	0,006	0,5	80,5	48,0	0,5	0,1	12,3	10,8	7,16	14,31	12,07	11,31
36	90,0	1,50	0,006	0,5	81,0	48,4	0,5	0,1	12,3	10,8	7,16	14,32	11,31	10,67
37	92,5	1,54	0,006	0,5	81,5	48,9	0,5	0,1	12,3	10,8	7,16	14,32	10,67	10,13
38	95,0	1,58	0,006	0,5	82,0	49,3	0,5	0,1	12,3	10,9	7,17	14,33	10,13	9,68
39	97,5	1,63	0,006	0,5	82,5	49,8	0,5	0,1	12,3	10,9	7,17	14,34	9,68	9,29
40	100,0	1,67	0,006	0,5	83,1	50,2	0,5	0,1	12,3	10,9	7,17	14,35	9,29	8,96
41	102,5	1,71	0,004	0,3	83,4	50,5	0,3	0,0	8,2	7,3	4,78	11,96	8,96	8,51
42	105,0	1,75	0,004	0,3	83,7	50,8	0,3	0,0	8,2	7,3	4,79	9,57	8,51	7,93
43	107,5	1,79	0,004	0,3	84,1	51,1	0,3	0,0	8,2	7,3	4,79	9,57	7,93	7,45
44	110,0	1,83	0,004	0,3	84,4	51,4	0,3	0,0	8,2	7,3	4,79	9,58	7,45	7,04
45	112,5	1,88	0,002	0,2	84,6	51,6	0,2	0,0	4,1	3,6	2,40	7,18	7,04	6,51
46	115,0	1,92	0,002	0,2	84,8	51,7	0,2	0,0	4,1	3,6	2,40	4,79	6,51	5,88
47	117,5	1,96	0,002	0,2	84,9	51,9	0,2	0,0	4,1	3,6	2,40	4,79	5,88	5,34
48	120,0	2,00	0,002	0,2	85,1	52,0	0,0	0,2	4,1	0,0	1,39	3,78	5,34	4,81
			1,000	85,1			51,9	33,2						
							<i>Chuva exc.</i>	<i>Infiltração</i>						

Fonte: Akan,1993- The Santa Barbara Urban Hydrograph Method, p. 103.

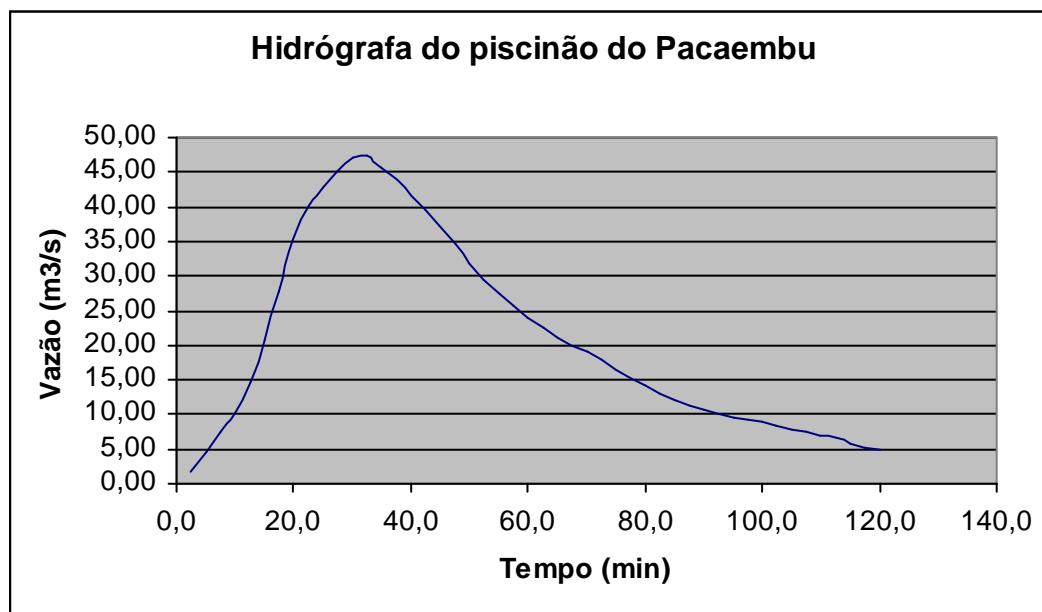


Figura 24.2- Hidrograma da bacia do Pacaembu para chuvas de 2horas escolhido por Canholi,1995

Exemplo 24.3- Caso real. Calcular a vazão de pico e a hidrograma usando o método Santa Bárbara de uma área urbana em Guarulhos com área de $1,12\text{km}^2$ (112ha) para período de retorno de 50 anos, hidrograma de Huff 1º quartil com 50% de probabilidade e equação da chuva de Martinez e Magni, 1999. Os intervalos são de 2,5min.

A diferença entre o Exemplo (24.3) e o Exemplo (24.1) é o intervalo de tempo. No primeiro exercício foi usado intervalo de 10min e agora vamos usar intervalo menor de 2,5min.

O resultando da vazão de pico será de $17,65\text{m}^3/\text{s}$ o que é um pouco maior que os $17,32\text{m}^3/\text{s}$ obtidos com o intervalo de 10min. Usando-se microcomputador o mais prático é usar o intervalo menor. Na Tabela (24.5) está a planilha de aplicação do método Santa Bárbara para o intervalo de tempo de 2,5min.

Tabela 24.5- Hidrograma da bacia urbana de Guarulhos de área perto da balança da rodovia Ayrton Sena usando o método Santa Bárbara para intervalo de 2,5min e período de retorno de 50anos

Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15
Ordem	Tempo		HUFF 1. Q 50% P	Precip. Total P	Prec. Acum. P acum.	Chuva exc. acum. Q acum.	Chuva exc. por faixa Q	Infiltraçã o f	Area imperme. i	Area permeável ie	I	I(1)+I(2)	Q(1)	Hidrogra ma Q(2)
	min	h	(%)	mm	mm	mm	mm	mm	mm/h	mm/h	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s
1	2,5	0,04	0,030	2,8	2,8	0,0	0,0	2,8	68,1	0,0	13,03	13,03	0,00	0,40
2	5,0	0,08	0,030	2,8	5,7	0,0	0,0	2,8	68,1	0,0	13,03	26,06	0,40	1,17
3	7,5	0,13	0,036	3,4	9,1	0,4	0,4	3,0	81,7	9,0	16,71	29,74	1,17	2,02
4	10,0	0,17	0,036	3,4	12,5	1,3	1,0	2,4	81,7	23,1	18,40	35,12	2,02	2,97
5	12,5	0,21	0,061	5,8	18,3	3,9	2,6	3,2	138,5	61,5	33,86	52,26	2,97	4,39
6	15,0	0,25	0,061	5,8	24,0	7,3	3,4	2,4	138,5	80,5	36,14	70,00	4,39	6,27
7	17,5	0,29	0,076	7,2	31,2	12,2	4,9	2,3	172,6	117,7	47,12	83,26	6,27	8,44
8	20,0	0,33	0,076	7,2	38,4	17,6	5,4	1,7	172,6	130,7	48,66	95,78	8,44	10,86
9	22,5	0,38	0,052	4,9	43,3	21,5	3,9	1,0	118,1	94,7	33,93	82,59	10,86	12,73
10	25,0	0,42	0,052	4,9	48,2	25,6	4,1	0,8	118,1	97,9	34,32	68,24	12,73	14,04
11	27,5	0,46	0,052	4,9	53,2	29,8	4,2	0,7	118,1	100,5	34,63	68,95	14,04	15,29
12	30,0	0,50	0,052	4,9	58,1	34,1	4,3	0,6	118,1	102,7	34,89	69,52	15,29	16,49
13	32,5	0,54	0,033	3,1	61,2	36,8	2,8	0,4	74,9	66,1	22,25	57,14	16,49	17,23
14	35,0	0,58	0,032	3,0	64,2	39,5	2,7	0,3	72,7	64,7	21,65	43,90	17,23	17,52
15	37,5	0,63	0,026	2,5	66,7	41,7	2,2	0,3	59,0	53,0	17,64	39,29	17,52	17,65
16	40,0	0,67	0,025	2,4	69,1	43,9	2,1	0,2	56,8	51,2	17,00	34,64	17,65	17,63
17	42,5	0,71	0,022	2,1	71,1	45,8	1,9	0,2	49,9	45,3	14,98	31,98	17,63	17,53
18	45,0	0,75	0,021	2,0	73,1	47,6	1,8	0,2	47,7	43,4	14,33	29,31	17,53	17,35
19	47,5	0,79	0,014	1,3	74,5	48,8	1,2	0,1	31,8	29,1	9,56	23,89	17,35	17,02
20	50,0	0,83	0,014	1,3	75,8	50,0	1,2	0,1	31,8	29,1	9,57	19,13	17,02	16,56
21	52,5	0,88	0,014	1,3	77,1	51,2	1,2	0,1	31,8	29,2	9,58	19,15	16,56	16,13
22	55,0	0,92	0,014	1,3	78,4	52,4	1,2	0,1	31,8	29,3	9,59	19,17	16,13	15,73
23	57,5	0,96	0,013	1,2	79,7	53,6	1,1	0,1	29,5	27,2	8,91	18,50	15,73	15,33
24	60,0	1,00	0,012	1,1	80,8	54,6	1,0	0,1	27,2	25,2	8,23	17,14	15,33	14,92
25	62,5	1,04	0,012	1,1	81,9	55,7	1,1	0,1	27,2	25,2	8,24	16,47	14,92	14,51
26	65,0	1,08	0,012	1,1	83,1	56,7	1,1	0,1	27,2	25,3	8,24	16,48	14,51	14,12
27	67,5	1,13	0,011	1,0	84,1	57,7	1,0	0,1	25,0	23,2	7,56	15,80	14,12	13,74
28	70,0	1,17	0,011	1,0	85,1	58,7	1,0	0,1	25,0	23,2	7,56	15,12	13,74	13,36
29	72,5	1,21	0,008	0,8	85,9	59,4	0,7	0,1	18,2	16,9	5,50	13,06	13,36	12,94
30	75,0	1,25	0,008	0,8	86,7	60,1	0,7	0,1	18,2	16,9	5,50	11,01	12,94	12,49
31	77,5	1,29	0,006	0,6	87,2	60,6	0,5	0,0	13,6	12,7	4,13	9,63	12,49	12,02
32	80,0	1,33	0,006	0,6	87,8	61,1	0,5	0,0	13,6	12,7	4,13	8,26	12,02	11,53
33	82,5	1,38	0,006	0,6	88,4	61,7	0,5	0,0	13,6	12,7	4,13	8,26	11,53	11,08
34	85,0	1,42	0,006	0,6	88,9	62,2	0,5	0,0	13,6	12,7	4,13	8,26	11,08	10,65
35	87,5	1,46	0,006	0,6	89,5	62,7	0,5	0,0	13,6	12,8	4,13	8,27	10,65	10,25
36	90,0	1,50	0,006	0,6	90,1	63,3	0,5	0,0	13,6	12,8	4,14	8,27	10,25	9,88
37	92,5	1,54	0,006	0,6	90,6	63,8	0,5	0,0	13,6	12,8	4,14	8,27	9,88	9,53
38	95,0	1,58	0,006	0,6	91,2	64,3	0,5	0,0	13,6	12,8	4,14	8,27	9,53	9,19
39	97,5	1,63	0,006	0,6	91,8	64,9	0,5	0,0	13,6	12,8	4,14	8,28	9,19	8,88
40	100,0	1,67	0,006	0,6	92,3	65,4	0,5	0,0	13,6	12,8	4,14	8,28	8,88	8,59
41	102,5	1,71	0,004	0,4	92,7	65,8	0,4	0,0	9,1	8,5	2,76	6,90	8,59	8,28
42	105,0	1,75	0,004	0,4	93,1	66,1	0,4	0,0	9,1	8,5	2,76	5,52	8,28	7,94

43	107,5	1,79	0,004	0,4	93,5	66,5	0,4	0,0	9,1	8,5	2,76	5,52	7,94	7,62
44	110,0	1,83	0,004	0,4	93,8	66,8	0,4	0,0	9,1	8,5	2,76	5,52	7,62	7,32
45	112,5	1,88	0,002	0,2	94,0	67,0	0,2	0,0	4,5	4,3	1,38	4,14	7,32	7,00
46	115,0	1,92	0,002	0,2	94,2	67,2	0,2	0,0	4,5	4,3	1,38	2,76	7,00	6,66
47	117,5	1,96	0,002	0,2	94,4	67,4	0,2	0,0	4,5	4,3	1,38	2,76	6,66	6,33
48	120,0	2,00	0,002	0,2	94,6	67,5	0,0	0,2	4,5	0,0	0,87	2,25	6,33	6,01
			1,000	94,6			67,4	27,2						
							<i>Chuva exc.</i>	<i>Infiltração</i>						

Conforme a Tabela (24.8) obtemos o hidrograma para chuva de 2h. A chuva total de 50anos é de 94,6mm e o escoamento superficial (runoff) é de 67,531mm.

A vazão máxima é de 17,65m³/s que se dá a 37,53min, ou seja, 0,625h (ordem 15) na coluna 1.

Após 6,713h o runoff acaba totalmente e isto se dá na linha de ordem 161 conforme se pode ver na coluna 1.

Todo o programa é facilmente executado em planilha Excel da Microsoft.

Sendo a vazão base de 0,83m³/s e sendo a vazão de pico de 17,65m³/s a vazão total de pico será a soma das duas, ou seja:

$$0,83\text{m}^3/\text{s} + 17,65\text{m}^3/\text{s} = 18,48 \text{ m}^3/\text{s}$$

Portanto, a vazão de pico para projeto é de **18,48m³/s**.

A Figura (24.3) mostra a hidrograma obtida.

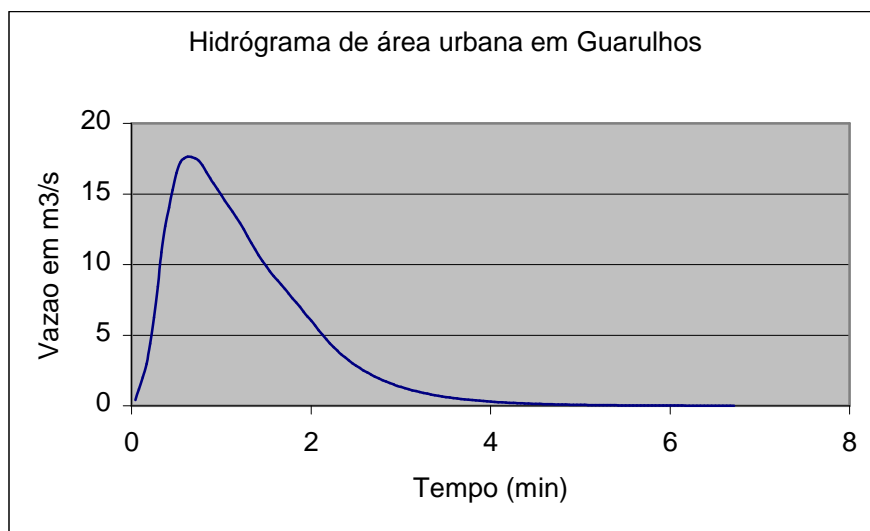


Figura 24.3- Hidrograma da bacia urbana em Guarulhos para chuva de 2h