

## Capítulo 12

# Chuva excedente- método do número CN do SCS

**“O homem que não crê em nada, acaba por não acreditar em si mesmo. Isso vale dizer não acreditará nos próprios juramentos e compromissos”**  
**Varoli**

## SUMÁRIO

| Ordem  | Assunto   |
|--------|---|
| 12.1   | Introdução  |
| 12.1.1 | Característica do solo  |
| 12.1.2 | Pesquisas feitas no país, nos estados ou em regiões ou cidades                    |
| 12.1.3 | Capacidade mínima de infiltração no solo  |
| 12.2.  | Tabelas do número CN da curva de runoff   |
| 12.3   | Condições antecedentes do solo  |
| 12.4   | Estimativa do número CN para área urbana  |
| 12.5   | Área impermeável conectada e área impermeável não conectada                       |
| 12.6   | Estimativa de runoff ou escoamento superficial ou chuva excedente pelo método SCS |
| 12.7   | Limitações da equação conforme SCS  |
| 12.8   | Hietograma da chuva excedente   |
| 12.9   | Estimativa de área impermeável de macro-bacias urbanas                            |
| 12.10  | Aplicações e validade do método no número CN da curva de runoff (SCS)             |
| 12.11  | Comparação dos métodos de infiltração   |

## Capítulo 12- Chuva excedente - método do número CN do SCS

### 12.1 Introdução

Em junho de 1986 o Departamento da Agricultura dos Estados Unidos lançou o *Technical Release 55 (TR-55)* denominado “*Urban Hydrology for Small Watersheds*” que apresentou os procedimentos para estimativa do runoff e dos picos de descargas em bacias pequenas (250 km<sup>2</sup>). A edição que estamos tratando foi atualizada no apêndice A do TR-55 em janeiro de 1999.

O TR-55 incorporou no estudo apresentado os resultados do *U. S. Soil Conservation Service (SCS)* de janeiro de 1975.

Há três maneiras para se achar o número da curva de runoff CN do SCS, também chamado de coeficiente de escoamento superficial ou número de deflúvio CN.

1. Características do solo;
2. Pesquisas feitas no país, nos estados ou em regiões ou cidades;
3. Capacidade mínima de infiltração no solo.

#### 12.1.1 Características do solo

Segundo (McCuen, 1998) o SCS classificou nos Estados Unidos mais de 4.000 solos para verificar o potencial de runoff e classificou estes grupos em quatro, identificando com as letras A, B, C e D.

Conforme José Setzer e Rubem La Laina Porto no Boletim Técnico do Departamento de Água e Energia Elétrica - DAEE de maio/agosto de 1979 de São Paulo, foi apresentado pela primeira vez no Brasil “Tentativa de avaliação de escoamento superficial de acordo com o solo e o seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo”.

As quatro classificações de (Porto, 1995) são bastante elucidativas e referem-se a capacidade mínima de infiltração de cada tipo de solo conforme SCS e estão na Tabela (12.1) juntamente com os tipos de solos classificados por (Tucci, 1993).

**Tabela 12.1- Grupo de solos e características do solo**

| Grupo de solo | Características do solo  |
|---------------|--|
| A             | <p>solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1% (Porto, 1979 e 1995).</p> <p>Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila (Tucci et al, 1993).</p>  |
| B             | <p>solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada que a camada superficial (Porto, 1979 e 1995)</p> <p>Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média (Tucci et al, 1993).</p> |
| C             | <p>solos barrentos com teor total de argila de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidade de 1,2m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5m. Nota-se a cerca de 60cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade (Porto, 1979 e 1995).</p> <p>Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo (Tucci et al, 1993).</p>          |
| D             | <p>solos argilosos (30% a 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50cm de profundidade. Ou solos arenosos como do grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados (Porto, 1979 e 1995).</p> <p>Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial (Tucci et al, 1993).</p>   |

**Fonte: (Porto, Setzer 1979) e (Porto, 1995) e (Tucci et al, 1993).**

### **12.1.2 Pesquisas feitas no país, nos estados ou em regiões ou cidades**

Nos Estados Unidos todos os solos estão classificados conforme os grupos hidrológicos A,B,C ou D e fazem parte do TR-55 citado. O Brasil até a presente data não existe nenhuma pesquisa que fornecem os números CN da curva de runoff. No Estado de São Paulo, existem considerações globais feitas em 1979 por Setzer e Porto. Na região do Alto Tietê, existe estudo geológico dos 39 municípios da região metropolitana de São Paulo, onde os solos estão classificados, a fim de facilitar os dimensionamentos dos córregos, rios, canais e reservatórios de detenção e retenção.

### 12.1.3 Capacidade mínima de infiltração no solo.

(McCuen,1998) apresenta uma classificação dos quatro grupos A,B,C e D conforme Tabela (12.2) mostrando a *capacidade mínima de infiltração no solo* conforme o grupo do solo.

**Tabela 12.2- Capacidade mínima de infiltração conforme o grupo do solo**

| Grupo de solo | Capacidade mínima de infiltração (mm/h) | Média |
|---------------|---|-------|
| A             | 7,62 a 11,43                            | 9,53  |
| B             | 3,81 a 7,62                             | 5,72  |
| C             | 1,27 a 3,81                             | 2,54  |
| D             | 0 a 1,27                                | 0,64  |

Fonte: (McCuen,1998)

Uma maneira prática de se achar a capacidade mínima de infiltração é usando o infiltômetro, que deve ser representativo para a bacia em estudo.

Como exemplo, na bacia do Pacaembu a capacidade de infiltração mínima do solo achada por Canholi foi de 4,5mm/hora e verificando a Tabela (12.2) de McCuen, vê-se que o solo da região do Pacaembu poderia ser classificado como do grupo B por estar entre 3,81mm/h e 7,62 mm/h.

### 12.2 Tabelas do número CN da curva de runoff

O número da curva de runoff ou seja do escoamento superficial é CN também é um índice que representa a *combinação empírica* de três fatores: grupo do solo, cobertura do solo e condições de umidade antecedente do solo (McCuen, 1998).

Existem tabelas do número CN da curva de runoff para bacias rurais e para bacias urbanas. Os valores CN obtidos poderão ou não serem corrigidos posteriormente caso a situação do solo seja seca ou ter havido muita chuva.

Vamos usar as Tabelas (12.3) e Tabela (12.4) traduzidas do inglês por (Tucci, 1993).

**Tabela 12.3- Valores dos números CN da curva de runoff para bacias rurais**

| Uso do solo                         | Superfície do solo                 | Grupo do Solo |    |    |    |
|-------------------------------------|------------------------------------|---------------|----|----|----|
|                                     |                                    | 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 |
|                                     | Boas                               | 39            | 61 | 74 | 80 |
| Pastagens                           | Pobres, em curvas de nível         | 47            | 67 | 81 | 88 |
|                                     | Normais, em curvas de nível        | 25            | 59 | 75 | 83 |
|                                     | Boas, em curva 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                           | Muito 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 et al, 1993)

**Tabela 12.4- Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas**

| Utilização ou cobertura do solo   | Grupo de solos      |    |    |    |
|---|---------------------|----|----|----|
|   | 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 em boas condições   | 39                  | 61 | 74 | 80 |
| Prado em boas condições   | 30                  | 58 | 71 | 78 |
| Bosques ou zonas com cobertura ruim   | 45                  | 66 | 77 | 83 |
| Florestas: cobertura boa  | 25                  | 55 | 70 | 77 |
| Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, 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 <sup>2</sup> )  | % média impermeável |    |    |    |
| <500  | 65                  | 77 | 85 | 90 |
| 1000  | 38                  | 61 | 75 | 83 |
| 1300  | 30                  | 57 | 72 | 81 |
| 2000  | 25                  | 54 | 70 | 80 |
| 4000  | 20                  | 51 | 68 | 79 |
| 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 et al, 1993)**

### **Exemplo 12.1:**

Achar o número CN para área urbana com cerca de 65% de impermeabilização sendo o restante da área permeável recoberta com grama, sendo o solo tipo C

Conforme Tabela (12.4) achamos CN=90

### **12.3 Condições antecedentes do solo**

O SCS reconheceu a importância da condição antecedente do solo, pois, o mesmo poderá estar em condições normais ou muito seco ou muito úmido.

Em condições normais seria a condição II e condição úmida seria a III e a seca seria a I conforme Tabela (12.5).

**Tabela 12.5- Condições do solo em relação a situação do mesmo**

| Condição do solo | Situação do solo   |
|------------------|--|
| <b>I</b>         | Solo seco.   |
| <b>II</b>        | Condições médias do solo. É a condição normal das tabelas do número CN.          |
| <b>III</b>       | Solo úmido. Ocorreram precipitações nos últimos cinco dias. O solo está saturado |

Fonte: (McCuen, 1998)

A Tabela (12.6) apresenta os limites de 5 dias de chuva antecedente em relação ao período latente e ao período de crescimento da vegetação, para facilitar a classificação das condições do solo.

**Tabela 12.6- Limites de 5 dias de chuva antecedente em relação a período latente e período de crescimento**

| Condição do solo | Chuva antecedente de 5 dias em milímetros |                        |
|------------------|---|------------------------|
|                  | Período latente                           | Período de crescimento |
| I                | < 12,7mm                                  | <35,56mm               |
| II               | 12,7mm a 27,94mm                          | 35,56mm a 53,34mm      |
| III              | > 27,94mm                                 | > 53,34mm              |

Fonte: (McCuen, 1998)

Como as tabelas para achar o número CN se referem as condições normais chamada Condição II, conforme o solo antecedente estiver seco ou úmido terá que ser feito as correções do número CN, conforme Tabela (12.7).

**Tabela 12.7- Ajustamento do número CN da condição normal II para a condição para solo seco (I) e para solo úmido (II).**

| Condição normal II do número CN | Número CN correspondente para a devida Condição |              |
|---------------------------------|---|--------------|
|                                 | Condição I                                      | Condição III |
| 100                             | 100   | 100          |
| 95                              | 87  | 99           |
| 90                              | 78  | 98           |
| 85                              | 70  | 97           |
| 80                              | 63  | 94           |
| 75                              | 57  | 91           |
| 70                              | 51  | 87           |
| 65                              | 45  | 83           |
| 60                              | 40  | 79           |
| 55                              | 35  | 75           |
| 50                              | 31  | 70           |
| 45                              | 27  | 65           |
| 40                              | 23  | 60           |
| 35                              | 19  | 55           |
| 30                              | 15  | 50           |
| 25                              | 12  | 45           |
| 20                              | 9   | 39           |
| 15                              | 7   | 33           |
| 10                              | 4   | 26           |
| 5                               | 2   | 17           |
| 0                               | 0   | 0            |

Fonte: (McCuen, 1998)



### 12.4 Estimativa do número CN para área urbana

Para área urbana existe sempre uma parcela do solo que é impermeável. Na área impermeável o número CN do solo é CN=98. O coeficiente final  $CN_w$  composto é a soma composta do coeficiente da área permeável e da área impermeável com o peso correspondente da fração da área impermeável da seguinte forma, conforme (McCuen, 1998).

A equação abaixo é válida quando a porcentagem total da área impermeabilizada é maior que 30% (trinta por cento) da área total.

$$CN_w = CN_p \cdot (1-f) + f \cdot (98) \quad \text{(Equação 12.1)}$$

Sendo:

$CN_w$  = número CN composto da área urbana em estudo;

$CN_p$  = número CN da área permeável da bacia em estudo e

f = fração da área impermeável da bacia em estudo.

### Exemplo 12.2

Para o dimensionamento do piscinão do Pacaembu, Canholi considerou a fração impermeabilizada de 0,55.

Como já foi mostrado anteriormente o tipo de solo da região é o tipo B conforme classificação do SCS. Considerando a Tabela (12.4) em espaços abertos com relva com impermeabilização de 50% a 75% o valor de CN=69.

Vamos achar o número  $CN_w$  composto.

Sendo:

$CN_p = 69$

f = 0,55

$$CN_w = CN_p \cdot (1 - f) + f \cdot (98)$$

$$CN_w = 69 \cdot (1 - 0,55) + 0,55 \cdot (98) = 84,95 = 85$$

Portanto, o número CN que se poderia usar para o cálculo da chuva excedente na bacia do Pacaembu é  $CN_w = CN = 85$ .

### 12.5 Área impermeável conectada e área impermeável não conectada

O TR-55 do SCS, 1986 salienta a importância das áreas impermeáveis conectadas ou não. Uma área impermeável é conectada quando o escoamento superficial, isto é, o runoff escoar da área impermeável diretamente para o sistema de drenagem.

No Exemplo (12.2) da bacia de retenção do Pacaembu, a fração impermeável total é de 0,55 e a fração impermeável diretamente conectada é 0,45. Isto significa que 45% da área impermeável escoar diretamente para o sistema de galerias de drenagem enquanto que os outros 55% da área impermeável se escoar sobre uma área permeável.

O escoamento superficial da área impermeável, isto é, o runoff que se escoar sobre a área permeável, é que se chama área impermeável não conectada que no caso do piscinão do Pacaembu é de 55% da área impermeável.

(McCuen, 1998) apresenta a correção do número CN quando a porcentagem da área impermeabilizada total é menor que 30%. Somente neste caso é corrigido o valor de CN conforme a seguinte fórmula:

$$CN_c = CN_p + I_f (98 - CN_p) (1 - 0,5 R) \quad \text{(Equação 12.2)}$$

Sendo:

$CN_c$  = número CN ajustado, corrigido;

$CN_p$  = número CN da área permeável;

$I_f$  = fração da área impermeável total

R = fração da área impermeável que está não conectada, isto é, escoar sobre a área permeável.

**Exemplo 12.3 de área não conectada:**

Seja uma bacia em que são fornecidos os seguintes dados:  
 Fração impermeável da bacia =  $I_f = 0,25$ . Portanto, 25% da bacia é impermeável (<30%).  
 $R$  = fração da área impermeável que não está conectada  $R=0,50$ , isto é, supomos que 50% da área impermeável escoar sobre área permeável.

$CN_p = 61$  (suposto)

Achar  $CN_c = ?$

Aplicando a fórmula de McCuen temos:

$$CN_c = CN_p + I_f (98 - CN_p) (1 - 0,5 R)$$

$$CN_c = 61 + 0,25 (98 - 61) (1 - 0,50 \cdot 0,5) = 61 + 0,25 \cdot 37 \cdot 0,75 = 61 + 6,94 = 67,94 = 68$$

Verificamos pois, um aumento no número CN que era  $CN=61$  e como 50% da área impermeabilizada escoar sobre a área permeável, o número CN passou para  $CN=68$ .

**12.6 Estimativa do runoff ou escoamento superficial ou chuva excedente pelo método SCS**

Conforme TR-55 do SCS de 1986 o método do número CN da curva de runoff é fornecido pela equação:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{(Equação 12.3)}$$

Sendo:

$Q$  = runoff ou chuva excedente (mm);

$P$  = precipitação (mm);

$I_a$  = abstração inicial (mm) e

$S$  = potencial máximo de retenção após começar o runoff (mm).

A abstração inicial  $I_a$  representa todas as perdas antes que comece o runoff. Inclui a água retida nas depressões da superfície e interceptada pela vegetação, bem como, a água evaporada e infiltrada.

Empiricamente foi determinado nos Estados Unidos pela SCS que  $I_a$  é aproximadamente igual a :

$$I_a = 0,2 S \quad \text{(Equação 12.4)}$$

Substituindo o valor de  $I_a$  obtemos:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S) + \frac{25400}{CN}} \quad \text{válida quando } P > 0,2 S \quad \text{(Equação 12.5)}$$

$$\text{sendo } S = \frac{254}{CN} \quad \text{(Equação 12.6)}$$

A Equação (12.3) do valor de  $Q$  é válida quando a precipitação  $P > 0,2S$ .

Quando  $P < 0,2 S$ , o valor de  $Q=0$ .

### 12.7 Limitações da equação conforme SCS

- O número da curva CN descreve uma situação média e útil em determinados projetos;
- Usar o número da curva CN sempre com *precaução*, pois a equação não contém o parâmetro do tempo e não leva em consideração a duração da chuva ou a intensidade da mesma;
- Deve ser entendido que a aproximação da abstração inicial Ia consiste na interceptação inicial, infiltração, armazenamento na superfície, evapo-transpiração e outros fatores e que foi obtido em dados em bacias de áreas agrícolas. Esta aproximação pode ser especialmente importante em aplicações urbanas devido a combinação de área impermeáveis com áreas permeáveis que podem implicar numa significativa aumento ou diminuição de perda de água que pode não ser considerada;
- O número CN não é preciso quando o runoff é menor que 12,7mm;
- Quando o número CN composto achado for menor que 40 use outro procedimento para determinar o runoff.

### 12.8 Hietograma da chuva excedente

O hietograma da chuva excedente ou do escoamento superficial ou do runoff é a precipitação excedente na unidade do tempo. O prof. dr. Rubem La Laina Porto observa que para a aplicar a fórmula do SCS deve-se usar a *precipitação acumulada*.

**Exemplo 12.4- achar a chuva excedente do piscinão do Pacaembu usando período de retorno de 25anos e Equação da chuva de Martinez e Magni, 1999, chuva de 2h com CN=87.**

#### Coluna 1:

Na coluna 1 da Tabela (12.8) temos o tempo em horas em 48 intervalos de 2,5minutos. A duração da chuva é de 2h.

#### Coluna 2:

Temos o tempo em minutos.

#### Coluna 3:

Temos o tempo em horas.

#### Coluna 4:

Na coluna 4 temos os valores em números adimensionais de Huff para o 1º quartil com 50% de probabilidade. A soma de toda a coluna 4 deverá ser sempre igual a 1 (um). Supomos que este hietograma é aquele de fevereiro de 1983.

#### Coluna 5:

Consideramos que para período de retorno de 25anos, foi adotado a precipitação total de 85,1mm para chuva de 2h segundo a Equação de Martinez e Magni,1999.

Os valores da coluna 5 são obtidos multiplicando a coluna 4 pelo valor da precipitação total de 85,1mm. O valor total da coluna 5 deverá ser de 85,1mm totalizando as 48 faixas de 2,5min.

**Coluna 6:**

Na coluna 6 temos as precipitações da coluna 5 acumuladas até atingir o valor global de 85,1mm. A chuva acumulada é necessária para o uso da equação do SCN conforme veremos.

**Coluna 7:**

Para a coluna 7 recordemos que a chuva excedente Q é:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{válida quando } P > 0,2 S$$

sendo  $S = \frac{25400}{CN} - 254$

A Equação (12.8) do valor de Q é válida quando a precipitação  $P > 0,2S$ .

Quando  $P < 0,2 S$  o valor de  $Q = 0$ .

Como  $CN = 87$  o valor de

$$S = 25400/87 - 254 = 37,95$$

$$0,2 \cdot S = 0,2 \cdot 37,95 = 7,59 \text{mm}$$

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} = \frac{(P - 0,2 \cdot 37,95)^2}{(P + 0,8 \cdot 37,95)} = \frac{(P - 7,59)^2}{(P + 30,36)}$$

Obteremos também o Q acumulado.

Mas a equação achada só vale quando  $P > 0,2 S$  ou seja  $P > 7,59 \text{mm}$

Portanto, para a primeira linha o valor de P acumulado é 2,6mm e portanto  $Q = 0$ .

Para a segunda linha o P acumulado é 5,1mm que é menor que 7,59mm e portanto

$Q = 0$ .

Na terceira linha P acumulado é 7,7376mm que é menor que 8,964mm e portanto

$Q = 0$ .

Na quarta linha o valor de  $P = 11,2$  é maior que 7,59mm e portanto aplica-se a fórmula do SCS.

$$Q = \frac{(P - 8,964)^2}{(P + 35,856)} = \frac{(11,2 - 7,59)^2}{(11,2 + 30,36)} = 0,3 \text{mm}$$

e assim por diante achamos todos os valores da coluna 7.

Uma maneira prática de se obter a coluna 7 é usando a planilha Excel usando a função SE da seguinte maneira:

$$= \text{SE}(\text{Coluna 6} > 7,59; [( \text{coluna 6} - 7,59)^2 / (\text{coluna 6} + 30,36)]; 0)$$

O total da chuva excedente é de 51,9mm. Esta parte da chuva é que irá produzir o escoamento superficial, isto é, o runoff.

**Coluna 8:**

Os valores são da chuva excedente acumulada em milímetros e para achar por faixa é só fazer a diferença entre a linha com a linha anterior da coluna 7 obtendo assim a coluna 8.

**Coluna 9:**

Caso se queira saber como está a infiltração da mesma basta achar a diferença entre a chuva da coluna 5 com a chuva excedente por faixa da coluna 8. A infiltração total é de 33,2mm e não contribuirá para o escoamento superficial.

A somatória da infiltração de 33,2mm com o runoff de 51,09mm fornecerá a precipitação total de 85,1mm. Frizamos que desprezamos a evaporação.

**Tabela 12.8- Exemplo do piscinão do Pacaembu de como achar a chuva excedente ou runoff usando o método do número CN do SCS, CN=87, fórmula de Martinez e Magni, 1999 para Tr=25anos com precipitação total de 85,1mm**

| Coluna 1 | Coluna 2 | Coluna 3 | Coluna 4  | Coluna 5      | Coluna 6    | Coluna 7         | Coluna 8             | Coluna 9    |
|----------|----------|----------|-----------|---------------|-------------|------------------|----------------------|-------------|
|          |          |          | HUFF 1. Q | Precip. Total | Prec. Acum. | Chuva exc. acum. | Chuva exc. por faixa | Infiltração |
| Ordem    | Tempo    | Tempo    | 50% P     | P             | P acum.     | Q acum.          | Q                    | f           |
|          | min      | h        | (%)       | mm            | mm          | mm               | mm                   | mm          |
| 1        | 2,5      | 0,04     | 0,030     | 2,6           | 2,6         | 0,0              | 0,0                  | 2,6         |
| 2        | 5,0      | 0,08     | 0,030     | 2,6           | 5,1         | 0,0              | 0,0                  | 2,6         |
| 3        | 7,5      | 0,13     | 0,036     | 3,1           | 8,2         | 0,0              | 0,0                  | 3,1         |
| 4        | 10,0     | 0,17     | 0,036     | 3,1           | 11,2        | 0,3              | 0,3                  | 2,8         |
| 5        | 12,5     | 0,21     | 0,061     | 5,2           | 16,4        | 1,7              | 1,3                  | 3,8         |
| 6        | 15,0     | 0,25     | 0,061     | 5,2           | 21,6        | 3,8              | 2,1                  | 3,1         |
| 7        | 17,5     | 0,29     | 0,076     | 6,5           | 28,1        | 7,2              | 3,4                  | 3,1         |
| 8        | 20,0     | 0,33     | 0,076     | 6,5           | 34,6        | 11,2             | 4,0                  | 2,5         |
| 9        | 22,5     | 0,38     | 0,052     | 4,4           | 39,0        | 14,2             | 3,0                  | 1,4         |
| 10       | 25,0     | 0,42     | 0,052     | 4,4           | 43,4        | 17,4             | 3,2                  | 1,2         |
| 11       | 27,5     | 0,46     | 0,052     | 4,4           | 47,8        | 20,7             | 3,3                  | 1,1         |
| 12       | 30,0     | 0,50     | 0,052     | 4,4           | 52,3        | 24,1             | 3,4                  | 1,0         |
| 13       | 32,5     | 0,54     | 0,033     | 2,8           | 55,1        | 26,4             | 2,2                  | 0,6         |
| 14       | 35,0     | 0,58     | 0,032     | 2,7           | 57,8        | 28,6             | 2,2                  | 0,5         |
| 15       | 37,5     | 0,63     | 0,026     | 2,2           | 60,0        | 30,4             | 1,8                  | 0,4         |
| 16       | 40,0     | 0,67     | 0,025     | 2,1           | 62,1        | 32,2             | 1,8                  | 0,4         |
| 17       | 42,5     | 0,71     | 0,022     | 1,9           | 64,0        | 33,7             | 1,6                  | 0,3         |
| 18       | 45,0     | 0,75     | 0,021     | 1,8           | 65,8        | 35,2             | 1,5                  | 0,3         |
| 19       | 47,5     | 0,79     | 0,014     | 1,2           | 67,0        | 36,2             | 1,0                  | 0,2         |
| 20       | 50,0     | 0,83     | 0,014     | 1,2           | 68,2        | 37,2             | 1,0                  | 0,2         |
| 21       | 52,5     | 0,88     | 0,014     | 1,2           | 69,4        | 38,3             | 1,0                  | 0,2         |
| 22       | 55,0     | 0,92     | 0,014     | 1,2           | 70,5        | 39,3             | 1,0                  | 0,2         |
| 23       | 57,5     | 0,96     | 0,013     | 1,1           | 71,7        | 40,2             | 1,0                  | 0,2         |
| 24       | 60,0     | 1,00     | 0,012     | 1,0           | 72,7        | 41,1             | 0,9                  | 0,1         |
| 25       | 62,5     | 1,04     | 0,012     | 1,0           | 73,7        | 42,0             | 0,9                  | 0,1         |
| 26       | 65,0     | 1,08     | 0,012     | 1,0           | 74,7        | 42,9             | 0,9                  | 0,1         |
| 27       | 67,5     | 1,13     | 0,011     | 0,9           | 75,7        | 43,7             | 0,8                  | 0,1         |
| 28       | 70,0     | 1,17     | 0,011     | 0,9           | 76,6        | 44,5             | 0,8                  | 0,1         |
| 29       | 72,5     | 1,21     | 0,008     | 0,7           | 77,3        | 45,1             | 0,6                  | 0,1         |
| 30       | 75,0     | 1,25     | 0,008     | 0,7           | 78,0        | 45,7             | 0,6                  | 0,1         |
| 31       | 77,5     | 1,29     | 0,006     | 0,5           | 78,5        | 46,2             | 0,4                  | 0,1         |
| 32       | 80,0     | 1,33     | 0,006     | 0,5           | 79,0        | 46,6             | 0,4                  | 0,1         |
| 33       | 82,5     | 1,38     | 0,006     | 0,5           | 79,5        | 47,1             | 0,4                  | 0,1         |
| 34       | 85,0     | 1,42     | 0,006     | 0,5           | 80,0        | 47,5             | 0,4                  | 0,1         |
| 35       | 87,5     | 1,46     | 0,006     | 0,5           | 80,5        | 48,0             | 0,5                  | 0,1         |
| 36       | 90,0     | 1,50     | 0,006     | 0,5           | 81,0        | 48,4             | 0,5                  | 0,1         |

|    |       |      |       |             |      |      |                   |                    |
|----|-------|------|-------|-------------|------|------|-------------------|--------------------|
| 37 | 92,5  | 1,54 | 0,006 | 0,5         | 81,5 | 48,9 | 0,5               | 0,1                |
| 38 | 95,0  | 1,58 | 0,006 | 0,5         | 82,0 | 49,3 | 0,5               | 0,1                |
| 39 | 97,5  | 1,63 | 0,006 | 0,5         | 82,5 | 49,8 | 0,5               | 0,1                |
| 40 | 100,0 | 1,67 | 0,006 | 0,5         | 83,1 | 50,2 | 0,5               | 0,1                |
| 41 | 102,5 | 1,71 | 0,004 | 0,3         | 83,4 | 50,5 | 0,3               | 0,0                |
| 42 | 105,0 | 1,75 | 0,004 | 0,3         | 83,7 | 50,8 | 0,3               | 0,0                |
| 43 | 107,5 | 1,79 | 0,004 | 0,3         | 84,1 | 51,1 | 0,3               | 0,0                |
| 44 | 110,0 | 1,83 | 0,004 | 0,3         | 84,4 | 51,4 | 0,3               | 0,0                |
| 45 | 112,5 | 1,88 | 0,002 | 0,2         | 84,6 | 51,6 | 0,2               | 0,0                |
| 46 | 115,0 | 1,92 | 0,002 | 0,2         | 84,8 | 51,7 | 0,2               | 0,0                |
| 47 | 117,5 | 1,96 | 0,002 | 0,2         | 84,9 | 51,9 | 0,2               | 0,0                |
| 48 | 120,0 | 2,00 | 0,002 | 0,2         | 85,1 | 52,0 | 0,0               | 0,2                |
|    |       |      | 1,000 | <b>85,1</b> |      |      | <b>51,9</b>       | <b>33,2</b>        |
|    |       |      |       |             |      |      | <i>Chuva exc.</i> | <i>Infiltração</i> |

### 12.9 Estimativa de área impermeável de macro-bacias urbanas

Em dezembro de 1994 Néstor A Campana e Carlos E. M. Tucci apresentaram na Revista Brasileira de Engenharia (RBE) vol.2, nº2, estudo sobre “Estimativa de área impermeável de macro-bacias urbanas”.

Foram usadas para o algoritmo áreas impermeáveis de São Paulo, Porto Alegre e Curitiba. Foram usadas imagens do satélite *Landsat-TM* bandas 3, 4 e 5 e usado a abordagem *fuzzy* para calcular a área impermeável.

Os estudos concluíram que para bacias abaixo de 2 km<sup>2</sup> o erro está na faixa de 25% e para bacias maiores o erro tende a ficar na faixa de 15% e convergindo para erro de 10% em bacias acima de 4km<sup>2</sup>.

A tendência da impermeabilização mostrou que ela converge no intervalo de 60% a 70% com média aproximada de 65%. A variação dos erros em função da impermeabilização é uniforme até cerca de 70%. Acima de 70% os resultados podem ser tendenciosos.

Deverá se ter cuidado em aplicação das fórmulas para áreas pequenas com excessiva concentração de indústrias ou comércios, que possa distorcer a densidade média.

A aplicação da fórmula é para regiões com edifícios de apartamentos, industriais ou residências térreas.

Campana e Tucci apresentaram um gráfico da impermeabilização em porcentagem com a densidade populacional em hab/ha.

O gráfico pode ser colocado sob a forma de duas equações de retas para dois intervalos da seguinte maneira:

$$A_{imp} = -3,86 + 0,55 d \quad (\text{Equação 12.7}) \quad (7,02 \leq d \leq 115 \text{ hab/ha})$$

$$A_{imp} = 53,2 + 0,054 d \quad (\text{Equação 12.8}) \quad (\text{para } d > 115 \text{ hab/ha})$$

Sendo:

$A_{imp}$  = % da área impermeável e

$d$  = densidade populacional (hab/ha)

#### Exemplo 12.5- Caso real: bacia do rio Aricanduva na RMSP

Na região metropolitana de São Paulo (RMSP) o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) realizou em 1999 estudos sobre a bacia do Alto Tietê. Em particular estamos se referindo a bacia do rio Aricanduva com área de 100 km<sup>2</sup>.

Foram examinadas a densidade demográfica em hab/ha usando dados da Sempla da Prefeitura Municipal de São Paulo datado de 1996.

Conforme publicação do DAEE, de acordo com os últimos censos realizados pelo IBGE (1991 e 1996) para os distritos da bacia do rio Aricanduva, com uma área de 100km<sup>2</sup>, tem-se dados de densidade populacionais projetados para o ano 2000 que variam de 71,2hab/ha a 94,2hab/ha na região das cabeceira da bacia onde estão concentradas as maiores reservas de áreas verdes, como nos distritos parque do Carmo e São Mateus, até valores entre 137hab/ha e 163hab/ha em áreas mais densamente urbanizadas, como os distritos de vila Formosa e vila Prudente.

Para toda a bacia, a média desses valores é de 114,4hab/ha. Entre 1991 e 1996, a população total cresceu cerca de 0,8%, resultando uma média de crescimento anual de 0,16%.

No mesmo período entre 1991 e 1996 em média para toda a RMSP, o crescimento anual da população foi de 1,46%.

Admitindo-se que a população de toda a bacia do Aricanduva até o horizonte de projeto do ano de 2020, aumentasse em média de 1,46% ao ano, ter-se-ia um valor médio de densidade populacional projetado em torno de 153hab/ha.

$$114,4 \text{ hab/ha} \times (1 + 0,0146)^{20} = 152,87 = 153 \text{ hab/ha}$$

A exemplo do verificado em estudos mais recentes, para outros municípios como os integrantes da bacia do Aricanduva, os municípios que atualmente já atingiram valores desta ordem de grandeza.

Provavelmente já se encontram em estado de estagnação ocupacional, como é o caso específico do distrito da vila Prudente. Entende-se que o valor de 153 hab/ha seria um limite máximo de ocupação a ser alcançado também nos demais distritos integrantes da mesma bacia, onde se considera que ainda haveria espaço para essa expansão populacional.

Para se achar a área impermeabilizada podemos usar as Equações (12.7) e (12.8) de (Campana e Tucci, 1994) já citadas para densidade populacional maior que 115hab/ha.

$$A_{\text{imp}} = 53,2 + 0,054 d \quad (\text{para } d > 115\text{hab/ha})$$

Sendo:

$A_{\text{imp}}$  = % da área impermeável e

d= densidade populacional (hab/ha)

d= 153hab/ha

$$A_{\text{imp}} = 53,2 + 0,054 d = 53,2 + 0,054 \times 153 = 53,2 + 8,26 = 61,5 \%$$

Portanto a área impermeável para o ano 2020 foi estimada em 61,5%.

Quanto ao número da curva CN a ser aplicado a área permeável da bacia do Aricanduva, foi considerado o plano diretor de macrodrenagem da bacia do Alto Tietê-análise geológica e caracterização dos solos da bacia do Alto Tietê para avaliação do coeficiente de escoamento superficial de dezembro de 1998. Consultando o referido estudo foi achado CN= 66.

O valor de CN para o ano 2020 será calculado usando a Equação (12.1) de (McCuen,1998).

$$CN_w = CN_p \cdot (1-f) + f \cdot (98)$$

$CN_p$  = 66 (coeficiente de escoamento superficial da parte permeável)

f= fração da área impermeável =0,615 (61,5%)

$$CN_w = CN_p \cdot (1 - f) + f \cdot (98) = 66 \cdot (1-0,615) + 0,615 \cdot 98 = 85,68 = 86$$

Portanto, para o ano 2020 para a bacia do rio Aricanduva o coeficiente de escoamento superficial CN será igual a 86.

### **Exemplo 12.6- Caso real: bacia do córrego dos Meninos na RMSP**

A bacia do córrego dos Meninos tem 98,65 km<sup>2</sup> de área. A chuva adotada foi de 2 horas muito usada para bacias em torno de 100 km<sup>2</sup> na RMSP, pois são estas chuvas as que causam mais danos (Relatório do DAEE, 1999).

O procedimento para a previsão da densidade populacional corresponde ao mesmo raciocínio do rio Aricanduva. Toma-se a média da densidade populacional da região no período de 1991 a 1996 que foi de 103,4 hab/ha.

Fazendo-se uma projeção de 1,47% ao ano que foi o crescimento entre 1991 e 1996 em 24 anos teremos:

$$103,4 \text{ hab/ha} \times (1 + 0,0147)^{24} = 146,77 = 147 \text{ hab/ha}$$

Como limite para a região foi fixado o valor de 150 hab/ha sendo este adotado como a densidade populacional Equação de Campana e Tucci,1994 temos:

$$A_{\text{imp}} = 53,2 + 0,054 d \quad (\text{para } d > 115 \text{ hab/ha})$$

$$A_{\text{imp}} = 53,2 + 0,054 \cdot 150 = 53,2 + 8,1 = 61,3\%$$

Portanto a densidade populacional para o ano 2020 será de 61,3%.

O valor de CN=66 conforme estudos do Plano Diretor de Macrodrenagem do Alto Tietê,1998.

O valor de CN para o ano 2020 será calculado usando a Equação (12.1) de (McCuen,1998).

$$CN_w = CN_p \cdot (1-f) + f \cdot (98) \quad (98)$$

$CN_p = 66$  (coeficiente de escoamento superficial da parte permeável)

$f =$  fração da área impermeável  $= 0,613$  (61,3%)

$$CN_w = CN_p \cdot (1-f) + f \cdot (98) = 66 \cdot (1-0,613) + 0,613 \cdot 98 = 85,62 = 86$$

### Exemplo 12.7- Caso real: bacia do Alto Tietê na RMSP

A área da bacia é de 3.230 km<sup>2</sup>.

A chuva usada foi aquela do evento de 02/2//1983, que é semelhante a distribuição de Huff proposta em 1978, 1º quartil com 50% de probabilidade com intervalo de 0,5h. Foi usado o software CABEC- análise de bacias complexas desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulico de São Paulo- FCTH.

Baseado nos estudos da firma Promon 86, Hidroplan 95, IAG k=1,00 e IAG k=0,789 foi adotado os seguintes períodos de retornos e as respectivas precipitações totais em mm conforme Tabela (12.9).

O valor de k=0,789 se refere a distribuição espacial da chuva conforme equação de Paulhus e k=1 quando se considera que a distribuição pontual é a mesma. A fórmula adotada foi a de Felix Mero para duração de 1h a 24h.

**Tabela 12.9- Chuva de 24horas adotada para diversos períodos de retornos**

| Período de retorno<br>(anos) | Chuva de 24 horas adotada<br>(mm) |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 100                          | 122                               |
| 50                           | 111                               |
| 25                           | 99                                |
| 10                           | 84                                |
| 5                            | 76                                |
| 2                            | 60                                |

Fonte: (DAEE,1999)

Os coeficientes permeáveis do valor de CN são:

CN= 56 desde as cabeceiras do rio Tietê até a barragem da Penha

CN=63 entre a barragem da Penha e a foz do rio Pinheiros

CN=68 entre a foz do rio Pinheiros até a barragem Edgard de Souza

A bacia do Alto Tietê foi dividida em 99 sub-bacias, sempre usando os coeficientes CN citados datados de 1983.



Foi considerada a densidade de cada sub-bacia referente ao ano de 1998 e feitas as previsões para o ano 2020 usando o mesmo critério já citado (Campana e Tucci,1994).

### **12.10 Aplicações e validade do método no número CN da curva de runoff (SCS)**

*David H. Pilgrim e Ian Cordery* no capítulo 9 do livro *Handbook of Hydrology de David R. Maidment* de 1993 faz algumas observações sobre o método SCS muito usado nos Estados Unidos.

Foram feitas 1600 pesquisas nos estados de Nevada, Texas e Novo México e com 67% de probabilidade acharam variações do pico de vazão de mais ou menos 50%.

Tudo devido a dois fatores principais, a escolha do tempo de concentração e a escolha do coeficiente de escoamento superficial CN. As grandes falhas achadas foi em relação as condições antecedentes do solo e os resultados foram melhores para solos secos e com vegetação esparsa do que para solos com vegetação densa. O interessante é que vários outros autores acharam os mesmos problemas devido a vegetação densa ou esparsa.

Na Austrália foi desenvolvido um método probabilístico para determinar o coeficiente CN baseado em 139 bacias no leste daquele país.

O dr. Rubem La Laina Porto em 1995 no livro *Drenagem Urbana*, demonstra na análise de sensibilidade os resultados que se podem obter quando se varia o coeficiente CN por exemplo de 90 para 85 e se varia o tempo de concentração de 0,8h para 1h. Os resultados foram de 71m<sup>3</sup>/s para 44m<sup>3</sup>/s ou seja de 79% de diferença para variação do tempo de concentração e do CN consideradas normais.

Uma das conclusões que podemos tomar é não considerar o método SCS como um método determinístico, isto é, que conduz a um único resultado. Temos que usar modelo probabilístico para analisar os **riscos e as incertezas** como faz desde 1995 o *USACE (United States Army Corpy of Engineer)*.

### **12.11 Comparação dos métodos de infiltração**

Conforme Chin 2000 p. 3455, o Manual de Prática de Projetos de Construções de Sistemas Urbanos de Águas Pluviais elaborado em 1992 da *American Society of Civil Engineers (ASCE)* recomenda três métodos: Horton, Número da Curva e Green-Ampt.

Foram feitas várias comparações e chegou-se a conclusão que o método mais preciso é o Green-Ampt, porém o mais usado é o Número da Curva CN, pois o mesmo é recomendado pelo Departamento da Agricultura dos Estados Unidos e tem servido de base legal para o julgamento dos juizes em processos judiciais.