

4. CONSOLIDAÇÃO DOS CRITÉRIOS BÁSICOS

4.1 ASPECTOS GERAIS

O desenvolvimento de padrões e critérios de projeto para as obras de macrodrenagem tem como principal objetivo a consolidação de diretrizes a serem seguidas quando da elaboração dos respectivos projetos, além das principais limitações existentes para cada um dos problemas específicos, que deverão constituir as condições de contorno e restrições a serem consideradas no projeto, dentre as quais ressaltam-se:

J · Contribuições aos rios principais

Deverão ser analisadas para as condições de vazões excepcionais as sobre-elevações localizadas do nível d'água.

J · Identificação dos pontos de inundações

Identificação de todos os pontos baixos ao longo das margens do curso d'água, de modo a ser possível estabelecer os correspondentes perfis longitudinais que deverão orientar o arranjo básico a ser adotado para o projeto de canalização.

Nos casos em que seja impraticável manter a linha d'água de projeto do canal abaixo de um ou mais pontos baixos marginais, é necessário conceber soluções particulares de drenagem dos mesmos que deverão ser tratadas separadamente, seja mediante condutos paralelos ao canal principal até um ponto mais baixo a jusante, seja mediante conduto descarregando diretamente no canal, porém dotado de "flap gate" na saída ou, em último caso, um sistema localizado de drenagem por bombeamento.

J · Obstruções por pontes

Nos casos em que as pontes constituem restrições ao escoamento é conveniente verificar a possibilidade de melhorias, tais como: adequação hidrodinâmica de pilares, alteamento de tabuleiro e proteção dos encontros das pontes.

J · Travessias de tubulações e outros

As travessias mais freqüentemente são aquelas que atuam como suporte de adutoras, oleodutos, gasodutos, etc. As intervenções possíveis de serem efetuadas para melhoria das condições de escoamento são semelhantes ao caso das pontes.



J · Estrangulamento da calha ou seção do rio

Podem existir estrangulamentos do curso d'água causado por construções muito próximas ao leito, implicando em limitações sérias para a veiculação das vazões máximas desejáveis.

Nesses casos, mesmo concebendo soluções de canal ou galeria, as capacidades máximas possíveis podem estar aquém das necessidades reais. Nestas situações com restrições, a busca de soluções pode envolver um conduto de reforço, o desvio de vazões a montante para outro local ou, eventualmente, a implantação de reservatórios de detenção a montante.

J · Benfeitorias e edificações importantes

A ocorrência de benfeitorias e edificações importantes situadas nas margens de um curso d'água embora não constituam propriamente restrições à obra de canalização podem ter um certo peso no arranjo geral das obras de canalização, pela sua vinculação com a configuração do sistema viário local.

J · Restrições a jusante

É importante nos projetos de canalização apresentar eventuais restrições a jusante do trecho a canalizar, que podem limitar as vazões que venham a ser veiculadas pelo trecho objeto de estudo. Em tais casos a necessidade de criar reservatórios de detenção a montante pode ser uma imposição a ser considerada no projeto.

J · Espaço / Manutenção

São considerados além destas condições para implantação das obras de macrodrenagem, os aspectos relativos a espaços disponíveis para execução, operação e manutenção das obras, a existência de faixas viárias para o acesso como forma de propiciar a manutenção e conservação de taludes e de equipamentos, quando existentes, além de concepções que propiciem melhor forma de contenção para as linhas d'água nas enchentes.

No item a seguir são apresentados os critérios hidráulicos a serem observados quando da elaboração de projetos de drenagem.

4.2 CRITÉRIOS BÁSICOS DE PROJETO

O critério básico adotado no dimensionamento de obras de macrodrenagem refere-se a vazão correspondente a um determinado período de retorno (TR) deste evento, que para as avaliações de impactos e de riscos causados por inundações correspondem aos TR de 10, 25, 50 e de 100 anos. As vazões correspondentes ao período de retorno de 10 anos são usadas na verificação das dimensões das obras de canalizações e efeitos de cheias de menores relevância, e os correspondentes valores estimados com ocorrência de 100 anos destinam-se aos dimensionamentos das obras de controle de inundações, que são objeto deste plano.

Os fatores relacionados as vazões de dimensionamento são a chuva de projeto, as taxas de impermeabilização dos terrenos, que levam em consideração os índices de ocupação futuro estimado para a área de estudo, além do período de retorno, como a seguir apresentado.

4.3 ESTUDO HIDROLÓGICO

4.3.1 Aspectos Gerais

J - Descrição Geral da Área de Estudo

A Bacia do Ribeirão Quilombo está inserida na região da Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo – UGRHI – 5, denominada por Bacia do Rio Piracicaba, Capivari e Jundiá, segundo a Lei Estadual 7663 de 30/12/91, que trata do Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Esta unidade pertence a Bacia do Médio Tietê (BMT) do Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE.

Na Figura 4.1 esta apresentada o Mapa contendo as Unidades Hidrográficas do Estado de São Paulo e a localização da UGRHI – 5 criada a partir do Plano Estadual de Recursos Hídricos.

A bacia hidrográfica do Ribeirão Quilombo tem cerca de 396 km² que abrange os municípios de Americana, Nova Odessa, Sumaré, Hortolândia e parte dos municípios de Paulínia e Campinas.

A pluviosidade elevada que caracteriza o período de chuvas intensas contribui para o agravamento da situação da ocupação desta área, de elevado grau de comprometimento do meio físico, diante de ações antrópicas de desenvolvimento desordenado.

A localização da área de estudo e dos locais dos postos hidrológicos de medições de vazão (fluviométricos) e de chuva (pluviométricos) estão na Figura 4.2, extraída do Relatório Zero da bacia e apresentada a seguir.

4.3.2 Aspectos Hidrometeorológicos

A área de estudo pertence à área das UGRHI 5, situa-se entre as coordenadas geográficas 45°50' e 48°30' de longitude e 22°00' e 23°20' de latitude, na porção Centro-este do Estado de São Paulo.

Pela sua posição geográfica, a UGRHI encontra-se sob a influência das massas de ar Tropicais Atlântica e Continentais, e Polar Atlântica, apresentando diferenças dada, principalmente pela distância ao mar e influência do relevo, que atuam basicamente na circulação regional, afetando a distribuição e ocorrência das chuvas e o regime térmico.

A classificação dos tipos climáticos, feita com base no sistema de Köppen, tem-se o tipo Cfb, sem estação seca, com verão fresco; o Cfa, sem estação seca, com verões quentes; e o Cwa, com inverno seco e verão quente.

O regime pluviométrico é tropical típico, com um período chuvoso, iniciando em outubro e terminando em abril, e um período de estiagem, de maio a setembro, variando localmente o início e o término de cada um dos períodos. Os índices de precipitação pluviométrica situam-se entre 1.200 e 1.800 mm anuais.

O regime térmico apresenta características tropicais e subtropicais, conforme a área.

4.3.3 Estudo da Chuva de Projeto

J - Chuvas Intensas da Região

O Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Ribeirão Quilombo requer a análise de chuvas intensas na região. Isso é feito conhecendo-se as chamadas Equações IDF (Intensidade-Duração-Frequência). Essas equações são calculadas quando se dispõe de dados pluviográficos, ou seja dados da chuva em pequenos intervalos de tempo, em geral de no mínimo 5 minutos.

A região de estudo é monitorada especificamente por um posto pluviométrico do DAEE-SP, o Posto D4-104 – Piracicaba, a Lat. 22° 43'S e Long. 47° 39'W e altitude 500 m. A análise ora efetuada indica a semelhança hidrológica entre o posto de Piracicaba e a área de estudo.

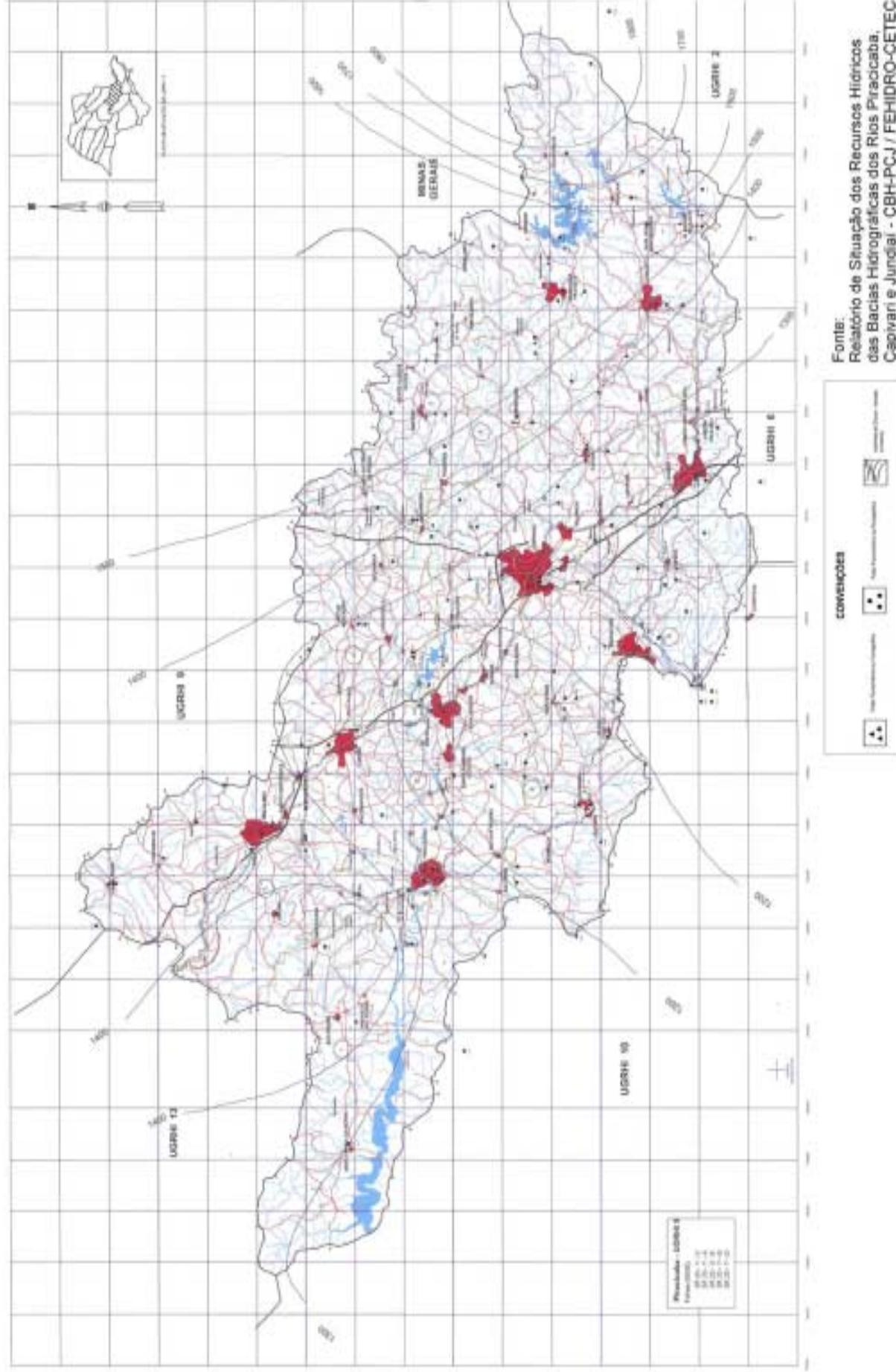


FIGURA 4.2 – ISOEITAS, POSTOS PLUVIOMÉTRICOS E FLUVIOMÉTRICOS

A equação do Posto de Piracicaba – a partir de estudos de Martinez e Magni (1998) é dada por:

$$i_{t,T} = 47,8273 \cdot (t + 30)^{40,9110} - 19,2043 \cdot (t + 30)^{40,9256} \cdot [40,4820 + 0,9273 \cdot \ln \ln \left(\frac{T}{T + 4} \right)] \quad (4.1)$$

Sendo:

i em mm/min (intensidade)

t em minutos (duração)

T em anos (período de retorno)

Se for adotado um intervalo único para a duração da chuva, deve ser considerado o limite superior das diferentes durações, uma vez que as chuvas com durações inferiores estarão inseridas na chuva de maior duração. Pode-se inclusive adotar o método de distribuição da chuva por blocos alternados, garantindo-se em cada intervalo de discretização da chuva, o seu período de retorno.

Nesse sentido, adota-se, na determinação das chuvas de projeto, a duração igual a aproximadamente o tempo de concentração das bacias hidrográficas drenadas, com discretização em intervalos de 30 em 30 min.

A Tabela 4.1 abaixo apresenta as intensidades de chuvas de diferentes durações, calculadas com a Equação de Piracicaba, para diferentes períodos de retorno. A Tabela 4.2 e a Figura 4.3 apresentam como exemplo a desagregação da chuva de 120 min e período de retorno de 25 anos a ser utilizada no modelo matemático.

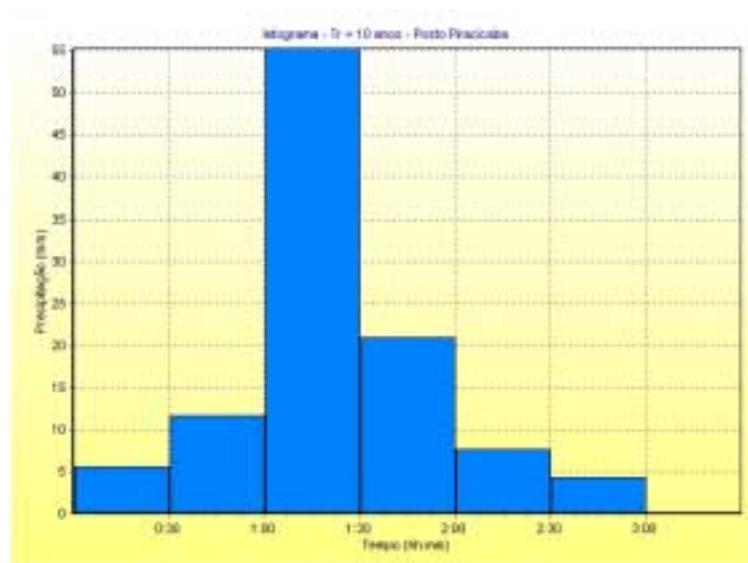
TABELA 4.1
INTENSIDADE DE CHUVA DO POSTO PIRACICABA I (MM/MIN.)

TR (anos)	DURAÇÃO (min.)				
	30	60	120	180	360
2	1,09	0,75	0,47	0,35	0,20
5	1,54	1,06	0,67	0,49	0,28
10	1,84	1,27	0,80	0,59	0,33
25	2,23	1,53	0,96	0,70	0,40
50	2,51	1,73	1,08	0,79	0,45
100	2,79	1,92	1,20	0,88	0,50

TABELA 4.2
DESAGREGAÇÃO DA CHUVA DE TR=25 ANOS
PARA DURAÇÃO DE 120 MIN

Bloco (h)	P (mm)
0,3	5,51
1,0	11,63
1,3	55,32
2,0	20,98
2,3	7,63
3,0	4,24

FIGURA 4.3
PLUVIOGRAMA SINTÉTICO DE PROJETO
PARA TR=25 ANOS



4.3.4 Modelação Hidrológica

Para a caracterização dos hidrogramas das vazões máximas nas sub-bacias que compõem a Bacia do Ribeirão Quilombo, necessita-se inicialmente da estimativa das vazões afluentes dos diferentes pontos de interesse, associadas a sua probabilidade de ocorrência.

Evidentemente, a melhor estimativa das vazões de enchente num determinado curso d'água, associadas a baixas probabilidades de ocorrência, é obtida quando são disponíveis dados de medições de vazão nos pontos de interesse. Estes dados entretanto são raros, e mesmo grandes metrópoles ainda não dispõem de estrutura operacional para a instalação de régua, limnigrafos e medidores de descarga.

Na ausência de dados são empregados métodos indiretos, nos quais, a partir de estimativas de chuva na região, projetam-se as vazões resultantes através do emprego dos modelos hidrológicos, como o Modelo CABC, adiante descrito.

J - Modelo hidrológico CABC

O modelo hidrológico CABC, desenvolvido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, permite a simulação do processo hidrológico de precipitação-retenção-infiltração numa bacia hidrográfica, que resultam no escoamento superficial direto.

O processo de modelação implica na adoção de uma lei de precipitações máximas, parâmetros de infiltração nos solos e índices físicos relativos às áreas impermeáveis e aquelas diretamente conectadas na drenagem superficial.

Com estes elementos é possível a geração dos hidrogramas resultantes a partir de diferentes modelos. Nos itens a seguir são descritos os principais passos do modelo CABC.

O cálculo das vazões afluentes foi efetuado a partir da determinação da precipitação máxima sobre a bacia considerando-se uma chuva de duração crítica a partir da relação existente entre Intensidade-Duração-Frequência de chuvas para a região.

Estas relações são de dois tipos, comumente chamados de "GERAL" e "LnLn". A equação geral pode ser expressa na forma:

$$i = m \left(\frac{T^n}{t + t_0} \right)^k \quad (4.2)$$

onde

i = intensidade da chuva em mm/minuto

T = tempo de recorrência em anos

t = duração da precipitação em minutos

K = parâmetro constante em mm/minuto

t_0 = parâmetro constante em minutos

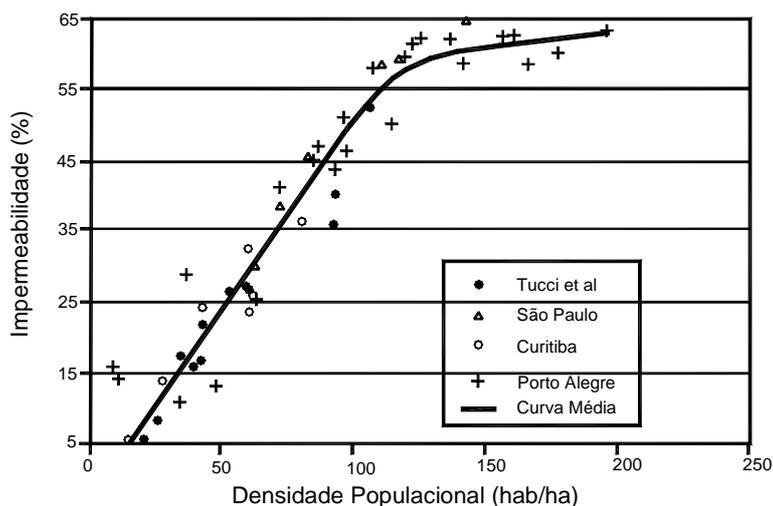
n, m = expoentes constantes

Uma vez definida a precipitação a ser considerada, a transformação chuva-vazão é efetuada a partir da consideração dos efeitos de infiltração e retenção da bacia. Nesta etapa são considerados os seguintes parâmetros:

a) Área Impermeável

A área impermeabilizada corresponde a fração da área total da bacia onde a precipitação escoar para uma área permeável ou para uma área interligada. Segundo o trabalho "Estimativa de Área Impermeável de Macro-Bacias Urbanas" realizado por Néstor Aldo Campana e pelo prof. Carlos E. M. Tucci, para as cidades brasileiras de Porto Alegre, São Paulo e Curitiba, é possível estabelecer uma relação entre a área impermeável e a densidade populacional da bacia. A impermeabilização converge no intervalo entre 60% e 70% para densidades populacionais maiores que 120 hab./ha, conforme mostra a Figura 4.4 a seguir.

FIGURA 4.4
TENDÊNCIA GERAL DA RELAÇÃO POPULAÇÃO-IMPERMEABILIDADE



b) Área Interligada

É a fração da área da bacia que despeja as águas pluviais diretamente na rede de drenagem, sem que existam perdas adicionais por infiltração entre o ponto que a precipitação atinge o solo e a entrada na rede de drenagem.

c) Área Permeável

É a região onde a água pode ser absorvida pelo solo.

d) Tempo de Duração e Concentração

O tempo de duração da precipitação deve ser igual ou superior ao tempo de concentração da bacia, ou seja, é o tempo necessário para que toda a área de drenagem passe a contribuir para a vazão na seção estudada.

Segundo estudos de Taylor e Schwarz, as características fisiográficas que influem principalmente no tempo de concentração são, a área da bacia, o comprimento e a declividade do canal mais longo e o comprimento ao longo do curso principal, desde o centro da bacia até a seção de saída considerada.

O tempo de concentração (t_c) não é constante para uma dada área, mas varia com o estado de recobrimento vegetal e a altura e distribuição da chuva sobre a bacia. Mas, para períodos de recorrência superiores a dez anos, a influência da vegetação parece ser desprezível.

No presente estudo o tempo de concentração foi determinado pelas equações:

$$\text{Kirpich } t_c | 57(C^3 / h)^{0.385}$$

$$\text{Kirpich II } t_c | 57(C^2 / s)^{0.385}$$

$$\text{Dooge } t_c | \frac{1.18\Delta a^{0.41}}{s^{0.17}}$$

sendo:

c = comprimento do curso em km

h = diferença de cotas

s = declividade equivalente m / km

a = área da bacia km²

A Figura 4.5 e 4.6 a seguir representam graficamente as relações adotadas.

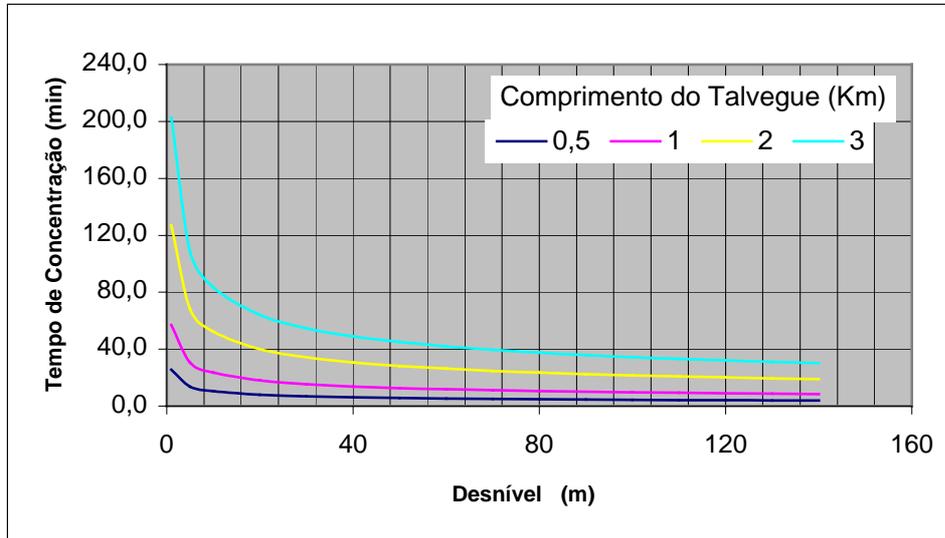


Figura 4.5 - Tempo de Concentração Segundo Kirpich

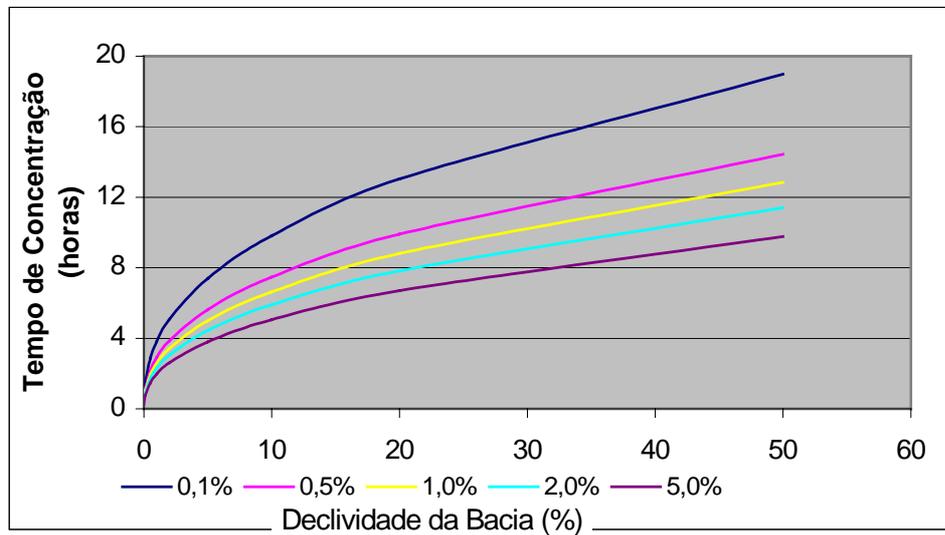


Figura 4.6 - Tempo de Concentração Segundo Dooge

O cálculo do escoamento superficial direto é efetuado através do Método do Soil Conservation Service do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Este método foi adaptado para as condições do Estado de São Paulo. A fórmula proposta pelo SCS é:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{2.28} \quad \text{para } P > 0.2 S$$

Onde Q é o escoamento superficial direto em mm P é a precipitação em mm e S é a retenção potencial do solo em mm. O valor de S depende do tipo de solo e pode ser determinado facilmente por tabelas próprias. A quantidade 0.2 S é uma estimativa das perdas iniciais (A_i) devidas à interceptação e retenção em depressões. Por esta razão impõe-se a condição P > 0.2 S.

Para facilitar a solução gráfica da equação faz-se a seguinte mudança de variável:

$$CN = \frac{1000}{2.28 \left(\frac{S}{25.4} \right)}$$

onde CN é chamado de 'Número da Curva' e varia entre 0 e 100. Os valores de CN dependem de três fatores: umidade antecedente do solo, tipo de solo e ocupação do solo.

O método do SCS distingue 3 condições de umidade de solo:

TABELA 4.3
CONDIÇÕES DE SOLO US SCS

Condição I	– Solos secos : As chuvas nos últimos dias não ultrapassam 1 mm
Condição II	– Situação muito freqüente em épocas chuvosas - as chuvas nos últimos 5 dias totalizam entre 1 e 40 mm
Condição III	– Solo úmido (próximo da saturação): as chuvas nos últimos dias foram superiores a 40 mm e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação

As tabelas para a obtenção de CN referem-se sempre à condição II. A transformação de CN para as outras condições de umidade é feita através da tabela a seguir:



TABELA 4.4
CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS VALORES DE CN PARA
DIVERSAS CONDIÇÕES DE UMIDADE DO SOLO

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

SCS distingue em seu método 5 grupos hidrológicos de solos. A adaptação do trabalho daquela entidade para o Estado de São Paulo, classificou tipos de solos como se segue.

Grupo A - Solos arenosos com baixo teor de argila totais inferior a 8% não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1 m. O teor de húmus é muito baixo não atingindo 1%.

Grupo B - Solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com maior teor de argila total porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas este limite pode subir a 20% graças a 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 1m, mas é quase sempre presente camada mais densificada do que a camada superficial.

Grupo C - Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30% mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1.2 m. No caso de terras roxas estes dois limites máximos podem ser 40% e 1m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade camada mais densificada que no grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

Grupo D - Solos argilosos (30-40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

Grupo E - Solos barrentos como C, mas com camada argilosa impermeável ou com pedras ou sem tal camada mas o teor de argila superando 40%. No caso de terras roxas esse teor pode subir a 60% (no caso D 45%).

A ocupação do solo é caracterizada pela sua cobertura vegetal e pelo tipo de defesa contra erosão eventualmente adotada. Os valores de CN podem ser obtidos através das curvas de Escoamento Superficial de Chuvas Intensas conforme o tipo hidrológico do solo e sua cobertura vegetal, sendo apresentado na Tabela 4.5 a seguir. A simplicidade e praticidade do método proposto pelo SCS o tornaram extremamente popular e difundido entre profissionais de todo o mundo.

e) Cálculo do Hidrograma

O modelo CABC utiliza, entre outros o método do Hidrograma Unitário Adimensional do SCS para transformação dos incrementos de escoamento superficial direto em vazões afluentes num determinado ponto da bacia.

O hidrograma adimensional do SCS é um hidrograma unitário sintético, onde a vazão (Q) é expressa como fração da vazão de pico (Q_p) e o tempo (t) como fração do tempo de ascensão do hidrograma unitário (t_p). Dadas a vazão de pico e o tempo de resposta (Lag-Time) para a duração da chuva excedente, o hidrograma unitário pode ser estimado a partir do hidrograma-adimensional sintético para uma dada bacia.

Os valores de Q_p e t_p podem ser estimados, utilizando-se um modelo simplificado de um hidrograma unitário triangular onde o tempo é dado em horas e as vazões em $m^3/s.cm$ (ou pes^3/pol) (SCS, 1972). A partir da observação de um grande número de hidrogramas unitários, o Soil Conservation Service sugere que o tempo de recessão seja aproximadamente $1.67 t_p$.



TABELA 4.5
VALORES DE CN EM FUNÇÃO DA COBERTURA E DO TIPO DE SOLO
(CONDIÇÃO II DE UMIDADE)

Tipo de uso do solo/Tratamento	Grupo Hidrológico			
	A	B	C	D
Condições hidrológicas				
Uso Residencial				
Tamanho médio do lote				
Até 500 m ²	65	77	85	90
1000 m ²	38	61	75	83
1500 m ²	30	57	72	81
% Impermeável				
Estacionamentos pavimentados, telhados	98	98	98	98
Ruas e estradas:				
Pavimentadas, com guias e drenagem	98	98	98	98
Com cascalho	76	85	89	91
de terra	72	82	87	89
Áreas comerciais (85% de impermeabilização)	89	92	94	95
Distritos industriais (72% de impermeabilização)	81	88	91	93
Espaços abertos, parques, jardins:				
Boas condições, cobertura de grama > 75%	39	61	74	80
Condições médias, cobertura de grama > 50%	49	69	79	84
Terreno preparado para plantio, descoberto				
Plantio em linha reta	77	86	91	94
Culturas em fileira				
Linha reta				
condições ruins	72	81	88	91
boas	67	78	85	89
curva de nível				
condições ruins	70	79	84	88
boas	65	75	82	86
Cultura de grãos				
Linha reta				
condições ruins	65	76	84	88
condições boas	63	75	83	87
curva de nível				
condições ruins	63	74	82	85
condições boas	61	73	81	84
Pasto:				
s/ curva de nível				
condições ruins	68	79	86	89
condições médias	49	69	79	84
condições boas	39	61	74	80
curva de nível				
condições ruins	47	67	81	88
condições médias	25	59	75	83
condições boas	6	35	70	79
Campos				
Condições boas	30	58	71	78
Florestas				
Condições ruins	45	66	77	83
Condições boas	36	60	73	79
Condições médias	25	55	70	77

Como a área sob o hidrograma unitário deve ser igual ao volume de escoamento superficial direto de 1 cm (ou 1 pol), pode ser visto que:

$$q_p \mid \frac{CA}{T_p}$$

onde C = 2.08 (ou 483.4 no sistema inglês) e A é a área de drenagem em Km² (ou milhas quadradas).

Um estudo posterior de hidrogramas unitários de muitas bacias rurais grandes e pequenas indicou que o tempo de resposta (Lag-Time) é aproximadamente igual a 60% de t_c , onde t_c é o tempo de concentração da bacia. Assim, o tempo de ascensão T_p pode ser expresso em função do tempo de resposta " t_p " e da duração da chuva excedente " t_r ".

$$T_p \mid \frac{t_r}{2} + t_p$$

Quando se dispõe de um hidrograma unitário para uma chuva excedente com uma determinada duração unitária Dt , pode-se obter os hidrogramas unitários para outras durações. Se essas durações forem múltiplas da duração dada, o novo hidrograma unitário pode ser obtido facilmente, aplicando-se os princípios da independência (ou superposição) e da proporcionalidade. Entretanto, para uma nova duração qualquer, pode-se aplicar um processo geral denominado "Método da Curva S".

A Curva S é um hidrograma resultante de uma chuva com intensidade unitária ($1/Dt$) e de duração infinita, obtido a partir da superposição de diversos hidrogramas unitários, cada um defasado de uma duração unitária em relação ao anterior.

Se a Curva S for desenhada com uma defasagem no eixo dos tempos igual a nova duração unitária pretendida (Dt'), pode se compreender que a diferença de ordenadas em cada instante " t " corresponde à ordenada de um hidrograma de escoamento superficial direto, resultante de uma chuva excedente com intensidade " $1/Dt$ " e duração " Dt' ". Para se converter esse hidrograma para um hidrograma unitário basta utilizar o princípio da proporcionalidade, para considerar a chuva unitária de intensidade " $1/Dt'$ " e duração " Dt' ", multiplicando-se a diferença das curvas S por Dt/Dt' .

Para a obtenção da Curva S basta recordar que no instante t seu valor corresponde a soma das ordenadas de hidrogramas unitários defasados da duração unitária Dt , isto é:

$$h'(t) \mid \frac{Dt}{Dt'} [S(t) + S(t - Dt) + S(t - 2Dt) + \dots]$$

$$S(t) \mid h(t) + h'(t - Dt) + h'(t - 2Dt) + \dots$$