

Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação

Aderson Sartori

adersonxt4@yahoo.com.br

Abel Maia Genovez

Universidade Estadual de Campinas

genovez@fec.unicamp.br

Francisco Lombardi Neto

Instituto Agrônomo de Campinas

flombardi43@yahoo.com.br

Recebido: 19/05/05 revisado: 12/07/05 aceito: 09/08/05

RESUMO

O modelo chuva-vazão do Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA) é um modelo muito utilizado em projetos de engenharia, seja para o cálculo da Chuva excedente ou estimativa do hidrograma de projeto. Contudo, sabe-se que o método tem como principal parâmetro o número da curva de escoamento superficial (CN). Sabe-se também que a classificação hidrológica do solo é de fundamental importância para a estimativa do CN e esta não foi desenvolvida para solos tropicais como os do Brasil. Sartori et al. (2005) apontam algumas dificuldades de sua aplicação e apresentam uma sugestão para a classificação hidrológica dos solos do Brasil tomando como base o trabalho de Lombardi Neto et al. (1989). Como toda proposta deve ser avaliada, este trabalho desenvolve-se com objetivo de analisar as respostas do modelo chuva-vazão do SCS aplicado com sua classificação hidrológica do solo original e com a classificação sugerida por Sartori et al. (2005) a eventos observados de precipitação para a estimativa da chuva excedente e da vazão de pico que foi obtida com o hidrograma unitário triangular do SCS e com o hidrograma unitário médio observado na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, município de Piracicaba, São Paulo, Brasil, com área próxima de 21,87 km². Os resultados simulados utilizando as duas classificações hidrológicas do solo foram comparados com os eventos observados na microbacia. Das comparações realizadas observou-se que melhores resultados foram obtidos com a classificação hidrológica sugerida por Sartori et al. (2005) e com o hidrograma unitário da microbacia. Esses resultados indicam que a classificação hidrológica do solo sugerida por Sartori et al. (2005) é mais adequada para as condições dos solos da bacia estudada e que o hidrograma unitário do SCS tende a superestimar a vazão de pico.

Palavras Chave: Escoamento Superficial; Grupo hidrológico do Solo; Hidrograma Unitário.

INTRODUÇÃO

No estudo de enxurradas e/ou enchentes máximas, uma falha na estimativa desses volumes pode acarretar grandes prejuízos. Uma vez superdimensionado tem-se o desperdício de capital e se subdimensionado leva a grandes prejuízos como a falha da estrutura e em muitos casos coloca em risco a saúde ou até vidas humanas. No entanto, o escoamento sempre existiu, mas o homem o desafia, aterrando grotas, canalizando córregos, fazendo plantios agrícolas sem pensar num manejo adequado, extraindo argilas de várzeas ou até mesmo de nas-

centes para a indústria cerâmica, sem avaliar os efeitos que estas mudanças acarretarão no escoamento. Como conseqüência aumentam as erosões rurais e surgem as erosões urbanas principalmente em loteamentos, agravam-se as inundações nas cidades e o assoreamento de grotas, córregos, rios e lagos, provocando a morte de nascentes, reduzindo a capacidade dos lagos e diminuindo a capacidade de transporte líquido dos canais intensificando as inundações. Porém isso vem mudando devido à escassez dos recursos hídricos, tornando-se fundamental o conhecimento do volume e distribuição do escoamento.

mento que é um parâmetro de entrada na tomada de decisão.

A quantificação do escoamento superficial é uma tarefa complexa e dependente de vários fatores, os quais são agregados a parâmetros ou variáveis em modelos de chuva-vazão. Quanto mais detalhado for o modelo mais difícil é sua aplicação, devido à necessidade de se conhecer e/ou obter de estudos experimentais os parâmetros para sua aplicação com certo grau de confiabilidade, salvo para aplicações em locais onde se possa calibrar e validar tais parâmetros que só é possível se houver registros de precipitação e de vazão, os quais são escassos no Brasil.

Um modelo simples e muito aplicado no dia a dia da engenharia e com razoável quantidade de informações disponíveis é o conhecido modelo chuva-vazão do Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA), que atualmente chama-se Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS).

Esse modelo, inicialmente desenvolvido para uso em áreas agrícolas, tem sido objeto de estudo, desenvolvimento e aplicação também em áreas urbanas. Com ele é possível: a) estimar a partir de informações do tipo, uso e umidade antecedente do solo, o número da curva de escoamento superficial (CN) e com este a parcela da precipitação que resultará em escoamento superficial, ou Chuva excedente; b) conhecida à Chuva excedente, estimar a distribuição e o volume do escoamento superficial de uma determinada área de drenagem, baseando-se no hidrograma unitário adimensional regionalizado para pequenas bacias dos Estados Unidos.

O CN é o principal parâmetro do modelo e para sua estimativa o SCS elaborou uma tabela que combina os quatro grupos hidrológicos do solo com diversos tipos de uso e manejo do solo. Esses valores foram obtidos em pequenas bacias e parcelas experimentais nos Estados Unidos da América (EUA).

No Brasil uma das dificuldades para estimar o CN está relacionada com a classificação hidrológica do solo (CHS), pois existem solos que não se enquadram nas definições dos grupos hidrológicos do solo definidos para os EUA pelo SCS. Isso foi discutido por Sartori et al. (2005) que apresentaram uma proposta para a classificação hidrológica dos solos do Brasil.

Com objetivo de complementar o trabalho de Sartori et al. (2005), neste artigo foram analisadas as respostas obtidas com o modelo do SCS que foi aplicado com sua classificação hidrológica e a sugerida por Sartori et al. (2005). Este trabalho foi realizado com dados de precipitação e vazão medi-

dos na Microbacia Hidrográfica do Ribeirão dos Marins com área de 21,87 km², Município de Piracicaba, São Paulo, Brasil.

MATERIAL E MÉTODO

Modelo do SCS

É um modelo empírico que permite estimar o volume e a distribuição do escoamento superficial. Pode-se dizer que o modelo é subdividido em duas partes: a) estimativa da Chuva excedente; b) cálculo do hidrograma de escoamento superficial.

A Chuva excedente é determinada pela equação SCS(1972):

$$Q = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P + 0,8.S} \quad \text{para } P > 0,2.S \quad (1)$$

sendo Q o volume do escoamento superficial ou Chuva excedente (mm), P a precipitação (mm) e S o potencial máximo de retenção (mm). O termo 0,2.S é a abstração inicial, ou seja, as perdas iniciais por interceptação, infiltração e retenção superficial.

O parâmetro S é estimado em função do número da curva de escoamento superficial (CN) e S está relacionado a ele por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

O modelo do SCS considera três condições de umidade antecedente (AMC) do solo para a estimativa do CN:

- AMC I: Condição em que os solos de uma bacia estão secos, mas não o suficiente para o ponto de murchamento das plantas;
- AMC II: Condição em que os solos encontram-se na “umidade ideal”, isto é, nas condições que precederam uma enchente máxima anual;
- AMC III: Condição em que os solos de uma bacia encontram-se quase saturados, quando da ocorrência de chuvas fortes ou fracas durante cinco dias anteriores a uma determinada chuva.

Os valores padronizados do CN, não apresentados aqui, estão definidos para a AMC II, no entanto o SCS (1972) apresenta uma tabela que correlaciona os valores do CN da AMC II com as

demais e também dá sugestões aproximadas baseadas no volume total precipitado nos cinco dias antecedentes ao evento considerado para enquadrar o CN numa das três categorias.

O SCS após uma extensiva análise de dados observados em várias pequenas bacias hidrográficas de diversas partes dos Estados Unidos definiu, a partir do hidrograma unitário médio que melhor representou os hidrogramas unitários obtidos para as diversas bacias hidrográficas estudadas, o hidrograma unitário adimensional utilizado pelo modelo.

Visando uma aplicação mais prática do modelo, o SCS aproximou o hidrograma unitário adimensional curvilíneo (HUC) por um hidrograma unitário adimensional triangular (HUT), o qual possui características similares ao HUC como o tempo de pico, o pico e o volume total escoado superficialmente que ocorre antes do tempo de pico, divergindo no tempo de base que é $8/3$ do tempo de pico ($2,67t_p$).

As equações a seguir são utilizadas na determinação do hidrograma unitário triangular para uma determinada bacia hidrográfica:

$$\text{- Tempo de pico: } t_p = \frac{2}{3} t_c \quad (3)$$

$$\text{- Tempo de recessão: } t_r = \frac{10}{9} t_c \quad (4)$$

$$\text{- Vazão de Pico: } q_p = 3,125 \cdot \frac{A \cdot Q}{t_c} \quad (5)$$

Nas equações anteriores, t_p é o tempo de pico (horas), t_r o tempo de recessão (horas), t_c o tempo de concentração (horas), q_p a vazão de pico (m^3/s), A a área de drenagem (km^2) e Q a Chuva excedente (cm).

Com os valores de q_p , A , t_c e $Q = 1$ cm, pode-se obter o hidrograma unitário triangular do SCS. O hidrograma unitário curvilíneo pode ser construído com os valores de q_p e t_p usando as relações tabeladas de t/t_p e q/q_p , não apresentadas neste artigo.

Para o desenvolvimento do hidrograma resultante a partir de uma dada precipitação é necessário adotar a duração da Chuva excedente. Ela deve ser adotada de modo que as variações da precipitação no período da duração da chuva excedente não afetem materialmente a precisão do método (Linsley e Franzini, 1978).

O SCS (1972) adota para uso com seu modelo a expressão:

$$D = 0,133t_c \quad (6)$$

sendo D a duração da Chuva excedente (horas).

Área de Estudo e Base de Dados

A bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins está localizada geograficamente entre as latitudes $22^{\circ}41'$ e $22^{\circ}51'$ sul e longitudes $47^{\circ}40'$ e $47^{\circ}45'$ oeste, à margem esquerda do rio Piracicaba, município de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil, possuindo uma área aproximada de $59 km^2$.

A área objeto deste estudo é a Microbacia Hidrográfica do Ribeirão dos Marins (MHRM), que está localizada na porção superior da Bacia Hidrográfica do Ribeirão dos Marins, a montante do posto hidrossedimentométrico 4D-006 com área aproximada de $21,87 km^2$.

As informações sobre as classes de solos que ocorrem na bacia foram obtidas da Carta Pedológica Semidetalhada do Estado de São Paulo (Oliveira e Prado, 1989) e estão apresentadas na figura 1. Esta carta foi digitalizada e fornecida no formato raster do Idrisi 2.0 por Machado (2002). O mapa de cobertura da terra (figura 2) foi elaborado com o apoio de levantamento de campo e de fotografias aéreas realizadas na bacia (Moretti, 2001). Os mapas foram posteriormente importados pelo software Spring 3.6 que é um SIG desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Para a delimitação da bacia de drenagem foram utilizadas cartas planialtimétricas do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) na escala 1:10.000, as quais foram digitalizadas para o entorno da área de estudo.

Os dados hidrológicos utilizados neste trabalho compreendem o período de Janeiro de 1999 a Fevereiro de 2002. São provenientes dos postos instalados na MHRM, os quais foram incorporados à rede do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e do Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH/USP). Neste estudo trabalhou-se com os dados de vazão do posto hidrossedimentométrico (4D-006) cuja função é medir as vazões mínimas, médias e máximas através da variação de nível e sedimentos. Os dados de precipitação utilizados foram os registrados nos pluviógrafos mecânicos (D4-116R e D4-118R) instalados na bacia. Ao todo são operados seis postos para medir chuvas sendo todos dotados de pluviômetros e dois de pluviógrafos.

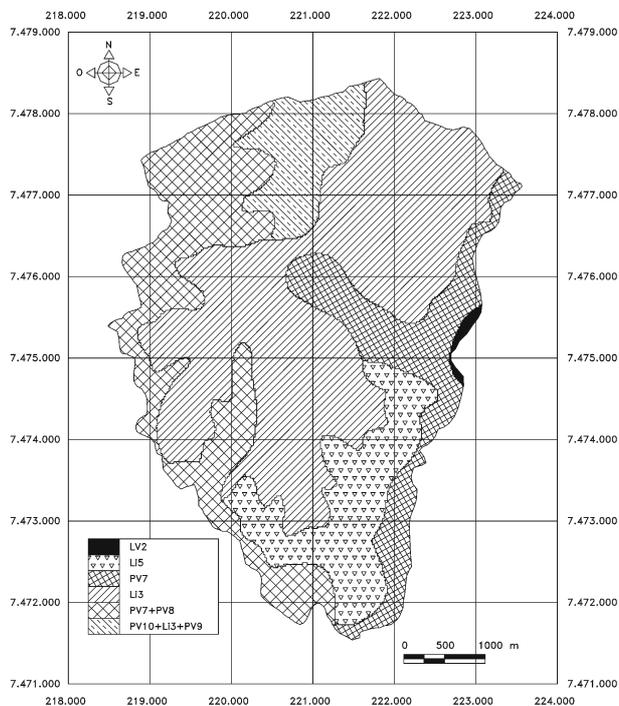


Figura 1 - Mapa de Solo Semidetalhado da MHRM (Projeção UTM - Sad 69, MC: O 45°).

Fonte: Adaptado de Machado, 2002.

A legenda expandida das classes de solos segundo Oliveira e Prado (1989) é:

- LV2: Latossolo Vermelho-Amarelo Álico, A moderado, textura média. Unidade Laranja Azeda;
- Li5: Solo Litólico Eutrófico, A moderado ou chernozêmico, substrato arenito das formações Botucatu ou Pirambóia.
- PV7: Grupamento indiscriminado de Podzólicos Vermelho-Amarelos abruptos, A moderado e espesso, textura arenosa/média. Unidade Serrinha.
- PV8: Grupamento indiscriminado de Podzólicos Vermelho-Amarelos abruptos, A moderado e espesso, textura arenosa/média, pouco profundos. Unidade Serrinha fase pouco profunda.
- PV9: Grupamento indiscriminado de Podzólicos Vermelho-Amarelos Tb abruptos, A moderado, textura arenosa/argilosa ou média/argilosa. Unidade Santa Cruz.
- PV10: Grupamento indiscriminado de Podzólicos Vermelho-Amarelos Eutróficos, A moderado, textura média/argilosa pouco profundos. Unidade Manduca.

- Li3: Solos Litólico Eutrófico ou Distrófico, A moderado, proeminente ou chernozêmico, substrato sedimentos indiscriminados do Grupo Passa Dois.
- PV7+PV8 e PV10+Li3+PV9 representam unidades de mapeamento com mais de uma unidade taxonômica simples ou grupamentos indiscriminados colocados em ordem decrescente de ocorrência e pelo sinal de +.

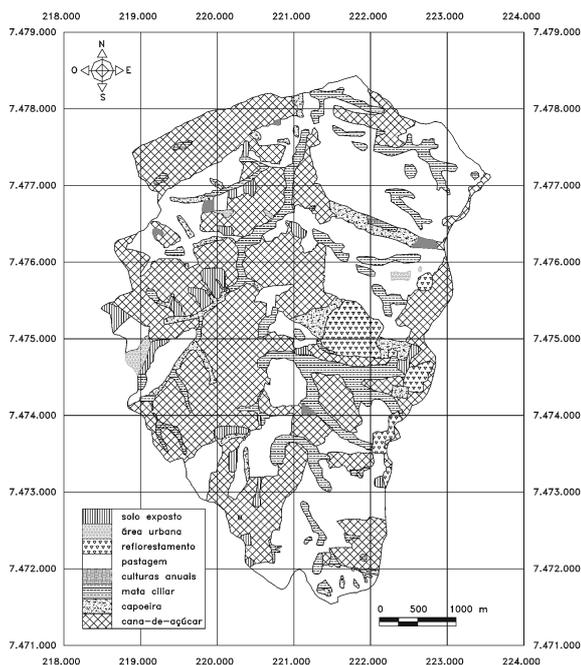


Figura 2 - Mapa de cobertura da terra da MHRM (Projeção UTM - Sad 69, MC: O 45°).

Fonte: Adaptado de Moretti, 2001.

Seleção dos Eventos e Determinação do Hidrograma Unitário Médio para a MHRM

Inicialmente foram reunidos os dados disponíveis para bacia. Do período de Janeiro de 1999 a Dezembro de 2000 foram usados os mesmos dados trabalhados por Moretti (2001) e Machado (2002). Para os anos posteriores, foram efetuadas as leituras dos pluviogramas correspondentes aos eventos previamente selecionados pelas maiores cotas das cheias observadas.

A partir das leituras do linigrama e do “Data Logger”, e usando as curvas cota-vazão obteve-se o fluviograma para o período de Janeiro de 2001 a Fevereiro de 2002. As cotas das cheias utilizadas neste estudo não ultrapassaram a cota máxima observada para a qual as curvas cota-vazão estão definidas. Dessa forma não houve a necessidade de extra-

polação da mesma, sendo apenas verificados os registros dos níveis d'água.

Uma análise de consistência dos dados foi feita construindo num mesmo gráfico o fluviograma e o hietograma para os períodos de dados previamente selecionados, o qual auxiliou na escolha das maiores e mais isoladas enchentes. A seleção final resultou em vinte hidrogramas observados, para os quais também foram anotadas as precipitações correspondentes.

O hidrograma de escoamento superficial observado (HES_{obs}) foi obtido pela separação dos escoamentos.

Determinado os vinte HES_{obs} pôde-se calcular a precipitação total excedente e o hidrograma unitário (HU) para cada evento. A duração da Chuva excedente D para cada HU foi obtida pelo método do índice ϕ (Chow, 1964).

Os HU's escolhidos para determinar o HU médio representativo da bacia foram aqueles cuja duração da chuva excedente permitiu agrupar pelo menos quatro eventos. Para cada grupo com mesma D desenhou-se o HU médio representativo alinhando-os pelo pico. Ao HU representativo de cada grupo aplicou-se o procedimento da curva-S encontrando novos HU's, para a duração da chuva excedente determinada com a equação 6. Alinhando esses novos HU's pelo pico, desenhou-se o HU médio representativo da bacia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição do CN médio

O complexo hidrológico solo-cobertura da terra é a parte fundamental para a composição do CN médio da bacia e este a principal variável para estimar a chuva excedente aplicando a metodologia do SCS. Os complexos hidrológicos foram obtidos pela análise de tabulação cruzada do Spring v.3.6 cujo produto final foram às áreas das intersecções entre as classes dos planos de informação de solo e de cobertura da terra, ou seja, as áreas de cada complexo hidrológico conforme mostra a tabela 1.

Na tabela 2 encontra-se a classificação hidrológica dos solos da microbacia segundo Sartori et al. (2005) e SCS (1972). Para a classificação do SCS utilizou-se como critério à textura do solo, uma vez que esse é o maior enfoque da definição dos grupos hidrológicos dado pelo SCS.

O CN médio foi estimado por meio de uma composição ponderada relacionando os diversos complexos hidrológicos solo-cobertura da terra

ocorridos no interior da bacia e os valores do CN apresentados na tabela 3. A condição hidrológica superficial média foi adotada. De acordo com os resultados obtidos por Sartori (2004), pode-se concluir que não se justifica a adoção das condições hidrológicas superficiais, uma vez que os critérios para sua obtenção são subjetivos, o CN não é uma constante e os resultados no geral são de mesma ordem de grandeza.

Para sua composição final foram feitas duas considerações. A primeira diz respeito às unidades de mapeamento de solo com mais de uma unidade taxonômica simples. Nesse caso, considerou-se que a área da unidade PV10+Li3+PV9 é composta por 50% do PV10, 30% do Li3 e 20% do PV9, e a unidade PV7+PV8 é composta por 60% do PV7 e 40% do PV8. Na segunda, adotou-se para os usos do solo nos quais constam apenas valores do CN para as condições hidrológica superficiais "boa" e "má", o valor do CN obtido pela média dos valores apresentados.

Como resultado final apresentam-se dois valores para o CN médio da microbacia:

- CN = 80,9 de acordo com Sartori et al. (2005);
- CN = 68,5 de acordo com SCS (1972).

Simulação do Escoamento Superficial

Foram realizadas seis simulações as quais serão denominadas de S1, S2, S3, S4, S5 e S6. Em ambas as simulações o modelo chuva-vazão do SCS foi aplicado às precipitações dos eventos observados para cálculo da Chuva excedente. Nas simulações S1, S3 e S5 os CN's foram estimados com a CHS original do SCS e para as simulações S2, S4 e S6 com CHS sugerida por Sartori et al. (2005).

Para as simulações de S1 a S4, utilizou-se HUT para o cálculo do hidrograma de escoamento superficial. Esse hidrograma é definido a partir do tempo de concentração da bacia.

Nas simulações S1 e S2 o tempo de concentração foi estimado pela fórmula de Kirpich utilizando como declividade do talvegue principal a relação entre a diferença de cotas do ponto mais alto do talvegue principal com o exutório e seu comprimento e nas simulações S3 e S4 com a declividade equivalente que tem sob si a mesma área do perfil real do talvegue tomando-se como referência uma linha horizontal na mesma cota do exutório. Nas simulações S5 e S6 utilizou-se o HU médio representativo da bacia.

Tabela 1 - Áreas em km² dos complexos hidrológicos, uso e unidades de solo.

Solo Uso	PV10+Li3+PV9	PV7+PV8	Li3	PV7	Li5	LV2	Totais
Cana-de-açúcar	0,74	2,64	3,52	1,17	0,92	0,08	9,07
Capoeira	0,06	0,08	0,55	0,14	0,02	0,00	0,85
Mata ciliar	0,27	0,15	1,49	0,07	0,46	0,00	2,44
Culturas anuais	0,01	0,03	0,04	0,01	0,00	0,00	0,09
Pastagem	0,51	1,43	3,93	0,93	1,18	0,00	7,98
Reflorestamento	0,00	0,00	0,08	0,50	0,12	0,00	0,70
Área Urbana	0,01	0,08	0,04	0,00	0,00	0,00	0,13
Solo exposto	0,04	0,19	0,26	0,04	0,08	0,00	0,61
Totais	1,64	4,60	9,91	2,86	2,78	0,08	21,87

Tabela 2 - Classificação hidrológica dos solos da microbacia

Solo	Sartori et al. (2005)	SCS (1972)
LV2	B	B
Li5	D	B
PV7	C	A
PV8	D	A
PV9	C	B
PV10	D	B
Li3	D	C

Tabela 3 - Valores do CN atribuído a cada complexo hidrológico (TR-55, 1986)

Uso do Solo	Manejo do solo	Condição Hidrológica	Grupo Hidrológico do Solo			
			A	B	C	D
Plantios em linha (Cana-de-açúcar)	C & T	má	66	74	80	82
		boa	62	71	78	81
Capoeira e mata ciliar	-	média	35	56	70	77
Plantios em linha (Culturas anuais)	C	má	70	79	84	88
		boa	65	75	82	86
Pastagem	-	média	49	69	79	84
Reflorestamento	-	média	36	60	73	79
Fazendas e chácaras (Área urbana)	-	-	59	74	82	86
Terra arada	Solo exposto	-	77	86	91	94

Os resultados obtidos nas simulações podem ser observados nas figuras de 3 a 6. Em síntese são apresentados:

Volume total escoado superficialmente ou precipitação total excedente - Q

- a) Simulações S1, S3 e S5: Cerca de 90% dos eventos foram subestimados. A média da relação entre os volumes simulados e observados foi de 0,31.
- b) Simulações S2, S4 e S6: Cerca de 55% dos eventos foram subestimados. A média da relação entre os volumes simulados e observados foi de 0,93.

Vazão de pico dos hidrogramas

- a) Simulação S1: Cerca de 70% dos eventos foram subestimados. A média da relação entre as vazões de pico simuladas e observadas foi de 0,72;
- b) Simulação S2: Cerca de 25% dos eventos foram subestimados. A média da relação entre as vazões de pico simuladas e observadas foi de 2,16;
- c) Simulação S3: Cerca de 70% dos eventos foram subestimados. A média da relação entre as vazões de pico simuladas e observadas foi de 0,57;
- d) Simulação S4: Cerca de 30% dos eventos foram subestimados. A média da relação entre as vazões de pico simuladas e observadas foi de 1,70;
- e) Simulação S5: Cerca de 90% dos eventos foram subestimados. A média da relação entre as vazões de pico simuladas e observadas foi de 0,34;
- f) Simulação S6: Cerca de 60% dos eventos foram subestimados. A média da relação entre as vazões de pico simuladas e observadas foi de 0,99.

Observando-se a figura 3, verifica-se que as precipitações excedentes simuladas com a classificação hidrológica sugerida por Sartori et al. (2005) melhor se distribuíram em torno da reta 1:1, enquanto que as obtidas com a classificação original do SCS ficaram praticamente todas abaixo dessa reta. As linhas tracejadas representam uma variação de 25% acima e abaixo da condição ideal. Os valores nulos não foram desenhados.

A variação dos resultados é natural visto que o CN pode ser tratado como uma variável randômi-

ca (Hjelmfelt, 1991), ou seja, ele varia de evento para evento. Dessa forma, ao adotar um valor único para o CN na AMC II ou tendência média, é de se esperar que em média os resultados sejam satisfatórios, pois dificilmente todos os eventos simulados responderiam exatamente como os observados e vários fatores podem contribuir com essa variabilidade tais como os estágios da cobertura da terra, o manejo agrícola, a umidade do solo e possivelmente a intensidade da chuva.

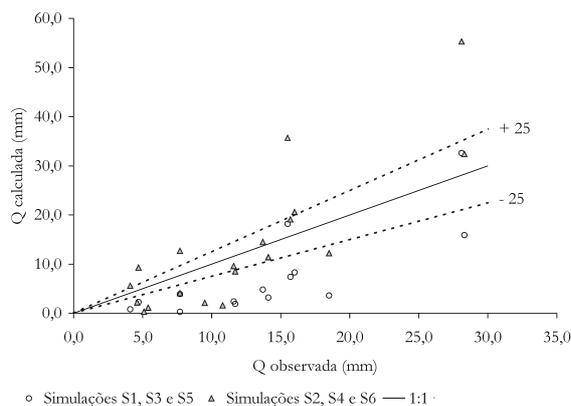


Figura 3 - Dispersão entre a precipitação total excedente simulada e a observada

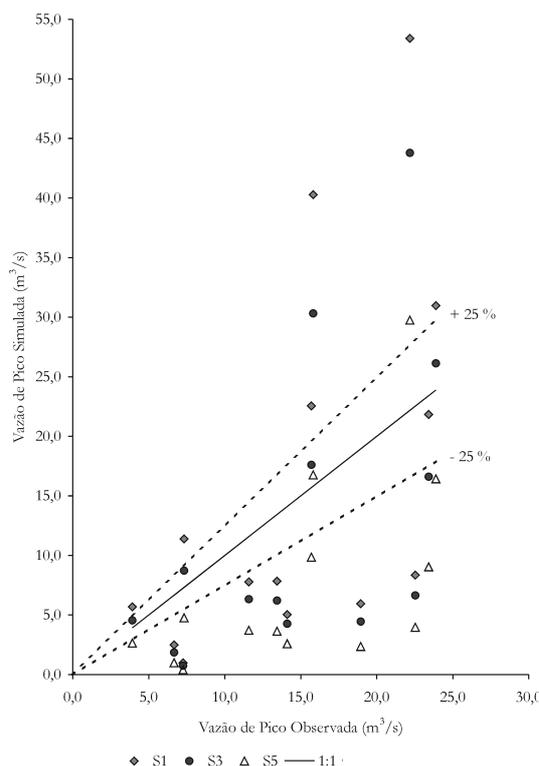


Figura 4 - Dispersão entre a vazão de pico simulada com a CHS original do SCS e a vazão de pico observada.

Considerando que o método não foi elaborado para prever uma taxa de infiltração, mas sim o volume total da infiltração para um dado evento, ou seja, o método foi suposto para prever a tendência média e não a resposta de chuvas individuais, as quais podem se desviar da tendência central (Ponce, 1996), os resultados obtidos com a classificação sugerida por Sartori et al. (2005) podem ser considerados satisfatórios.

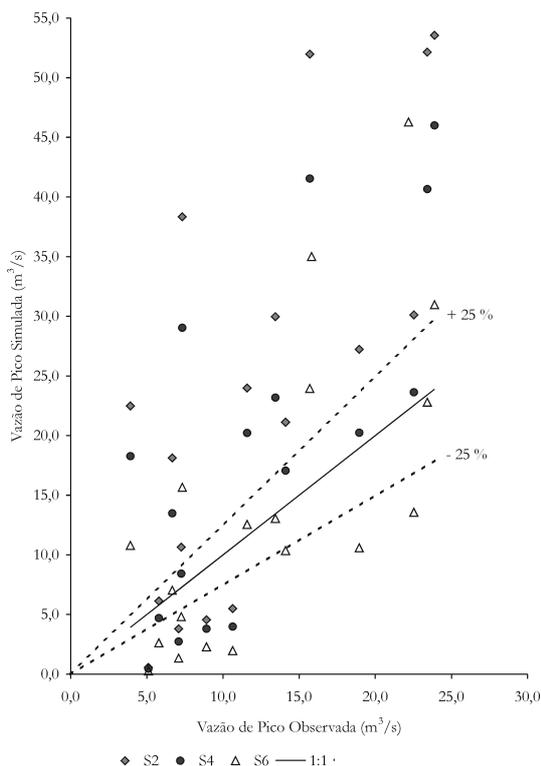


Figura 5 - Dispersão entre a vazão de pico simulada com a CHS sugerida por Sartori et al. (2005) e a vazão de pico observada.

As figuras 4 e 5 mostram que há uma tendência do HUT superestimar as vazões de pico do hidrograma final. Os resultados obtidos nas simulações S5 e S6 apresentaram coerência entre as tendências médias das vazões de pico dos hidrogramas de escoamento superficial e de seus volumes. Em geral quando o volume foi superestimado ou subestimado, devido a influência da classificação hidrológica, a vazão de pico também foi.

Na figura 6 é apresentada uma comparação entre os CN's obtidos com as classificações hidrológicas do solo e com as metodologias da Otimização (Sartori et al., 2004) e do "P/S" (Hawkins et al.

1985). Observa-se nessa figura que os valores encontrados para o CN com os métodos da Otimização (CN = 79,6) e do "P/S" (CN = 77,4) são mais próximos do CN estabelecido com a classificação sugerida por Sartori et al. (2005), justificando mais uma vez os melhores resultados obtidos.

Ao aplicar o HU da microbacia e o CN observado de cada evento, igualando os volumes calculados com os observados, houve uma variação nas vazões de pico as quais foram bem distribuídas em torno da média, variando de 0,77 a 1,39 vezes a vazão de pico observada, sendo 80% dessa variação pertencente ao intervalo de 0,80 a 1,30. Isso mostra que ele é suficientemente representativo para a microbacia.

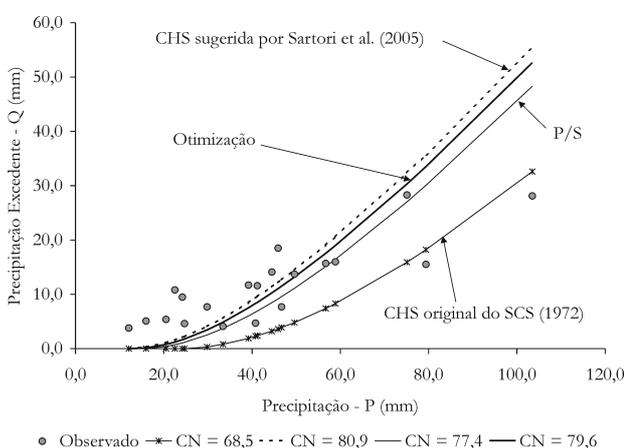


Figura 6 - Curvas do CN estimadas para a microbacia com as classificações hidrológicas e com os métodos da Otimização e do "P/S".

A Figura 7 mostra uma comparação entre os HU's do SCS e da microbacia. Observando as equações 3, 4 e 5, nota-se a grande influência do tempo de concentração na forma do hidrograma unitário do SCS. Para eliminar a influência de cálculo do tempo de concentração na forma dos HU's do SCS e compará-los com o HU médio representativo da microbacia, eles foram definidos a partir do tempo de pico do HU médio observado. Com isso, os tempos de pico foram igualados, mas a vazão de pico ainda foi superior a observada, sendo numericamente 43 % superior.

Genovez (1991) ao aplicar o HUT a quinze pequenas bacias do Estado de São Paulo, também encontrou resultados que mostram essa tendência. Em seu trabalho, cerca de 67% dos eventos apresen-

taram volumes calculados inferiores aos volumes observados. Quanto à vazão de pico, 57% dos resultados obtidos foram superiores a vazão de pico observada, chegando muitas vezes a serem maiores que o dobro da vazão de pico observada.

Baseando-se nas comparações realizadas neste estudo e em Genovez (1991), pode-se concluir que o HU do SCS tende a superestimar as vazões de pico do hidrograma final e sua classificação hidrológica original, para alguns solos arenosos e argilosos, tende a subestimar e superestimar o CN, respectivamente. Dessa forma se o valor do CN for subestimado, o volume também será e em contrapartida a vazão de pico poderá se aproximar da observada. No entanto se o valor estimado para o CN for representativo ou próximo deste, a vazão de pico será superestimada, conforme mostra a figura 8. Isso sugere que o hidrograma unitário do SCS deve ser utilizado com cautela.

No geral os resultados obtidos na simulação S6 foram satisfatórios, considerando que o CN e o HU da microbacia representam valores médios do conjunto de eventos analisados, os quais são simplificações dos processos físicos envolvidos. Em função dessas simplificações eles podem ser inadequados para um determinado evento em particular, mas no conjunto são suficientemente representativos.

Partindo dos resultados apresentados pode-se deduzir que os solos analisados têm comportamento diferenciado daqueles para onde a classificação hidrológica do solo, proposta pelo SCS, foi desenvolvida, mostrando ser a classificação sugerida por Sartori et al. (2005) mais adequada para as condições dos solos da bacia estudada.

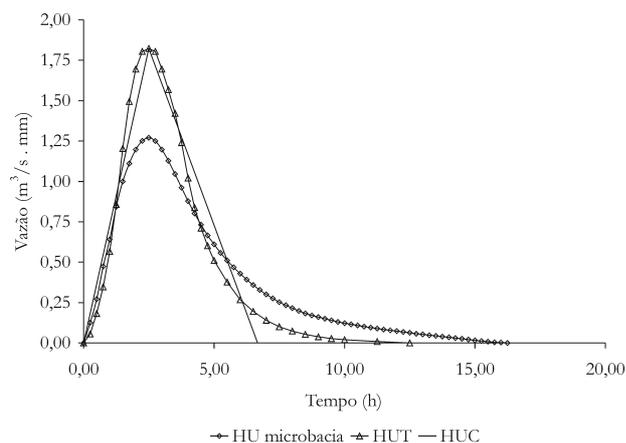


Figura 7 - Comparação entre os HU's do SCS definidos para $t_p = 2,5$ h e o HU da microbacia ($D = 15$ minutos)

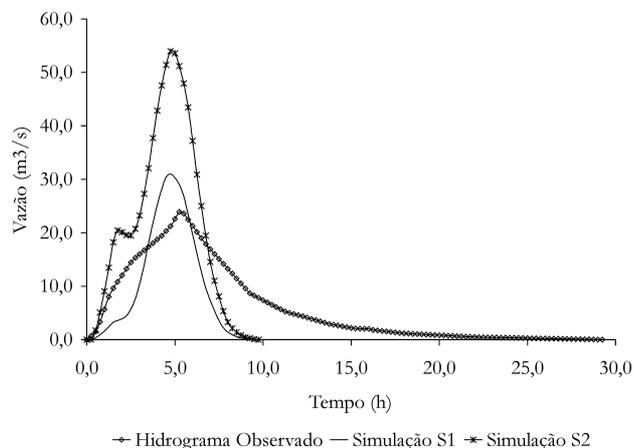


Figura 8 - Evento 03 - Comparação dos hidrogramas simulados e observado.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi aplicado o modelo chuva-vazão do SCS para avaliar o desempenho de duas classificações hidrológicas do solo. O resultados simulados foram comparados com os observados, o que nos permite obter algumas conclusões.

O hidrograma unitário do SCS tende a superestimar as vazões de pico dos hidrogramas resultantes. Para a microbacia estudada isso foi verificado independentemente do cálculo do tempo de concentração da bacia.

A classificação hidrológica do solo sugerida por Sartori et al. (2005) apresenta-se com maior clareza no que diz respeito aos critérios de classificação, diminuindo as dúvidas no momento da inclusão de um tipo de solo em um dos grupos hidrológicos.

A classificação hidrológica do solo sugerida por Sartori et al. (2005) é mais adequada para os solos da microbacia estudada, cabendo ressaltar que parte deles apresenta-se com textura arenosa no horizonte superficial e textura mais argilosa no horizonte subsuperficial, sendo classificados nos grupos C e D.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo e ao Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo pela disposição dos dados hidrológicos referentes a microbacia do Ribeirão dos Marins.

REFERÊNCIAS

- CHOW V. T. Runoff. In: Chow, V. T. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, 1964. Cap. 14, p. 1-54.
- GENOVEZ, A. M. *Avaliação dos métodos de estimação das vazões de enchente para pequenas bacias rurais do Estado de São Paulo*. Campinas, 1991. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas (FEC-UNICAMP).
- HAWKINS, R. H., HJELMFELT, A. T., e ZEVENBERGER, A. W. Runoff probability, storm depth, and curve numbers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.111, n.º4, p. 330-340, 1985.
- HJELMFELT, A. T. Investigation of Curve Number Procedure. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 117, p. 725-737, n.º 6, 1991.
- LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. *Engenharia de Recursos Hídricos*. São Paulo: Editora de Universidade de São Paulo e Editora McGraw-Hill do Brasil, 1978. Tradução e adaptação: Luiz Américo Pastorino.
- LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; GALETI, P. A.; BERTOLINI, D.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J.B. Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. *Simpósio sobre terraceamento agrícola*. Campinas, 1989. Fundação Cargill. p. 99-124.
- MACHADO, R. E. *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. Piracicaba, 2002. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo.
- MORETTI, L. R. *Avaliação da erosão superficial em pequenas bacias hidrográficas rurais*. São Paulo, 2001. 128p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- OLIVEIRA, J. B; PRADO, H. *Carta Pedológica Semidetalhada do Estado de São Paulo: Folha de Piracicaba*. São Paulo, Secretaria da Agricultura /CPC/IA; Secretaria de Economia e Planejamento /CAR/IGC. 1989, Mapa, escala 1:100.000.
- PONCE, V. M. *Notes of my conversation with Vic Mockus*. San Diego, California, July 15, 1996. Disponível em <<http://ponce.sdsu.edu>> acesso em 26/11/2003.
- SARTORI, A. *Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos*. Campinas, 2004. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2005. (Nesta edição).
- SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Métodos Empíricos para a Determinação do Número da Curva de Escoamento Superficial (CN) para Solos com Diferentes Usos e Manejos. *XXI Congresso Latino-americano de Hidráulica*. São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil, Outubro, 2004. CD ROM.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). *National Engineering Handbook: Section 4, Hydrology*. 1972.
- TECHNICAL RELEASE 55 (TR-55). *Urban Hydrology of Small Watersheds*. USDA, NRCS, 1986.

Hydrologic Classification of Brazilian Soils to Estimate Excess Rainfall using the Soil Conservation Service Method Part 2: Application

ABSTRACT

The rainfall-runoff model of the United States Department of Agriculture (USDA) Soil Conservation Service (SCS) is often used in engineering projects, either to calculate excess rainfall or for a design hydrograph. However, it is known that the main parameter of the method is the runoff curve number (CN). It is also known that the hydrologic soil classification is very important to estimate CN and it has not been developed for tropical soils such as those in Brazil. Sartori et al. (2005) point out a few difficulties for its application and present a suggestion for hydrologic soil classification in Brazil based on the work of Lombardi Neto et al. (1989). As all proposals deserve to be evaluated, this study is developed to analyze the responses of the rainfall-runoff model of SCS applied to the original hydrologic soil classification and with the classification suggested by Sartori et al. (2005) to observed precipitation events in order to estimate excess rainfall and peak flow which was obtained with the triangular unit hydrograph of the SCS and with the mean unit hydrograph representing Ribeirão dos Marins watershed, in the municipality of Piracicaba, São Paulo, Brazil, with an area close to 21.87

km². The simulated results using two hydrologic soil classifications were compared to the events observed in the watershed. From the comparisons made it was observed that a better result was obtained with the hydrologic classification suggested by Sartori et al. (2005) and with the representative unit hydrograph of the watershed. These results indicate that the hydrologic soil classification suggested by Sartori et al. (2005) is more appropriate for the soil conditions in the watershed studied and that the unit hydrograph of the SCS tends to overestimate peak flow

Keywords: Surface Runoff; Hydrologic Soil Group; Unit Hydrograph.