

GERAÇÃO DO DEFLÚVIO DE UMA MICROBACIA COM MATA ATLÂNTICA, CUNHA, SP¹
**RUNOFF GENERATION IN A SMALL CATCHMENT WITH ATLANTIC RAINFOREST,
CUNHA, SP, BRAZIL**

Maurício RANZINI^{2,4}; Cíntia Ferreira DONATO³;
Valdir de CICCIO²; Francisco Carlos Soriano ARCOVA²

RESUMO – Este trabalho teve como escopo estudar a resposta do deflúvio a eventos de precipitação de uma microbacia experimental (37,5 ha) com Mata Atlântica, localizada no Laboratório de Hidrologia Florestal Walter Emmerich, no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha, SP. O escoamento direto foi de 8,3% da precipitação anual. A resposta do deflúvio à precipitação mostrou uma variabilidade de hidrogramas, que dependeu da magnitude da precipitação e das condições de umidade antecedente do solo. De um modo geral, os hidrogramas tenderam grosseiramente a reproduzir a precipitação (hietograma). Foram identificados dois grupos de hidrogramas de acordo com a relação entre a precipitação e o pico de vazão. No primeiro, a contribuição do escoamento de base foi pequena, com o escoamento direto dominando o hidrograma e a área variável de afluência (A.V.A.). No segundo grupo, um acréscimo na precipitação produziu um aumento no pico de vazão mesmo durante as chuvas mais intensas, sugerindo que a A.V.A. ocupou uma menor parte da microbacia, próxima ao curso d'água. Esses resultados indicaram que a umidade antecedente do solo foi importante para a resposta do deflúvio à precipitação.

Palavras-chave: geração do deflúvio; precipitação; escoamento direto; escoamento de base; pico de vazão.

ABSTRACT – This paper studied the response of runoff to rainstorm events of a small experimental catchment (37.5 ha) with Atlantic Rainforest. The Forest Hydrological Laboratory, at Cunha, is located in the Serra do Mar State Park, SE Brazil. The total volume of stormflow is 8.3% of annual rainfall. The response of runoff to rainfall showed a variability of the hydrographs, which depended on intensity of the precipitation and soil humidity conditions before the flood. In general, the hydrographs tended to roughly reproduce the shape of the rainstorm. It was identified two groups of hydrographs, separated according to the quotient between rainfall and peak flow. At first, the contribution of base flow was low, with the direct runoff hydrograph dominating and the variable source area (V.S.A.). In the other, an increase in precipitation resulted in an increase in peak flow, even during the heaviest rainstorms, suggesting that V.S.A. occupied a smaller part of the catchment, close to the channel. These results indicated that antecedent soil moisture was important for the response of runoff to rainfall.

Keywords: runoff generation; rainfall; stormflow; base flow; peak flow.

¹Recebido para análise em 10.02.10. Aceito para publicação em 30.06.11. Publicado *online* em 29.12.11.

²Instituto Florestal, Rua do Horto, 931, 02377-000 São Paulo, SP, Brasil.

³Acadêmica do curso de Gestão Ambiental da Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

⁴Autor para correspondência: Maurício Ranzini – ranzini@if.sp.gov.br

1 INTRODUÇÃO

Os processos hidrológicos em microbacias recobertas com florestas vêm sendo estudados desde o século XIX, com o registro do primeiro estudo em 1850, na França, e na sequência em outros países (Andréassian, 2004). O experimento implantado nas montanhas do estado do Colorado, EUA, na região de Wagon Wheel Gap, de 1910 a 1926, destaca-se por ser o primeiro a utilizar o método de microbacias pareadas (Bates e Henry, 1928).

O Instituto Florestal de São Paulo, órgão da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, desenvolve, desde o final de 1970, pesquisas hidrológicas em microbacias hidrográficas com Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica), no Laboratório de Hidrologia Florestal Eng. Agr. Walter Emmerich – L.H.F.W.E., no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha, município de Cunha, SP. Três microbacias experimentais denominadas A, B e D são monitoradas continuamente, com medições das precipitações pluviométricas e do deflúvio (Cicco, 2004). Os resultados alcançados indicam que essas microbacias apresentam elevado rendimento hídrico e um regime de vazão estável durante todo o ano. Assim, essa região deve ser vista como estratégica para o suprimento de água para o Vale do Paraíba (Fujieda et al., 1997). Entretanto, faltam estudos que possibilitem entender os fatores que controlam e/ou influenciam a geração do deflúvio.

O deflúvio de uma microbacia pode ser considerado como o produto final da interação da água da chuva com características climáticas, fisiográficas e o uso do solo. É composto por dois processos principais: o escoamento direto, que é o volume de água que deixa a microbacia durante e imediatamente após a chuva, e o escoamento de base, que consiste na água que infiltra no solo e alimenta o curso d'água.

A representação gráfica das vazões escoadas ao longo do tempo em um curso d'água é denominada hidrograma e, a partir dele, podem ser obtidos o deflúvio total, a sua distribuição sazonal, o escoamento diário, o pico de vazão, o deflúvio mínimo e a frequência de várias taxas de fluxos (Hewlett, 1982).

De acordo com Chang (1982), outra forma de se analisar o deflúvio é através da curva de duração de fluxo, a qual permite calcular o percentual de tempo em que as descargas diárias permanecem em um determinado intervalo de valores ou excedem seu limite superior. A forma e a inclinação dessa curva refletem as características hidrológicas da microbacia. Assim, uma inclinação acentuada mostra o predomínio do escoamento direto no fluxo total da microbacia. Por outro lado, uma curva com uma inclinação suave revela uma contribuição preponderante do escoamento de base.

García-Ruiz et al. (2005) estudaram a resposta do deflúvio à precipitação em uma microbacia (284 ha) com vegetação arbustiva, em processo de regeneração há mais de 40 anos nos Pirineus, Espanha. Usaram a análise estatística para testar o peso de diferentes variáveis hidrológicas na geração do deflúvio. Identificaram dois grupos de hidrogramas separados pela resposta do pico de vazão ao evento de precipitação. Verificaram que essa separação pode ser explicada pela intensidade da precipitação e das condições antecedentes de umidade do solo.

Noguchi et al. (1997) investigaram a relação chuva-vazão numa microbacia (32,8 ha) recoberta por floresta tropical, na Malásia. Encontraram que a resposta do deflúvio à precipitação depende das condições de umidade do solo, que o escoamento direto aumenta quanto maior for a umidade do solo e o armazenamento de água no perfil do solo contribui para a diminuição do escoamento direto sob condições secas.

A presente pesquisa foi realizada com os dados de cinco anos hídricos (outubro de 2001 a setembro de 2006). Para a análise dos hidrogramas foram selecionados dois desses cinco anos, usando-se para isto o trabalho de Donato et al. (2008) que usaram o mesmo período de dados. Esses autores verificaram que o ano hídrico de 2006 apresentou a precipitação anual próxima à média do período, enquanto 2005 foi o mais chuvoso, o que é interessante para estudos de escoamento direto.

Este estudo teve como objetivos analisar as respostas do deflúvio à precipitação, identificar as diferentes formas de hidrograma, avaliar os fatores que explicam esta variabilidade ao longo do ano e contribuir no entendimento do funcionamento hidrológico de uma microbacia com Mata Atlântica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A microbacia A, com área de 37,5 ha, localiza-se nas cabeceiras do rio Paraíba,

um dos formadores do rio Paraíba do Sul (Figura 1). Possui altitudes variando de 1.030 m a 1.175 m, a declividade média é de 18°48', perímetro de 2.800 m, largura média de 350,5 m e o comprimento do canal principal de 1.070 m (Anido, 2002).

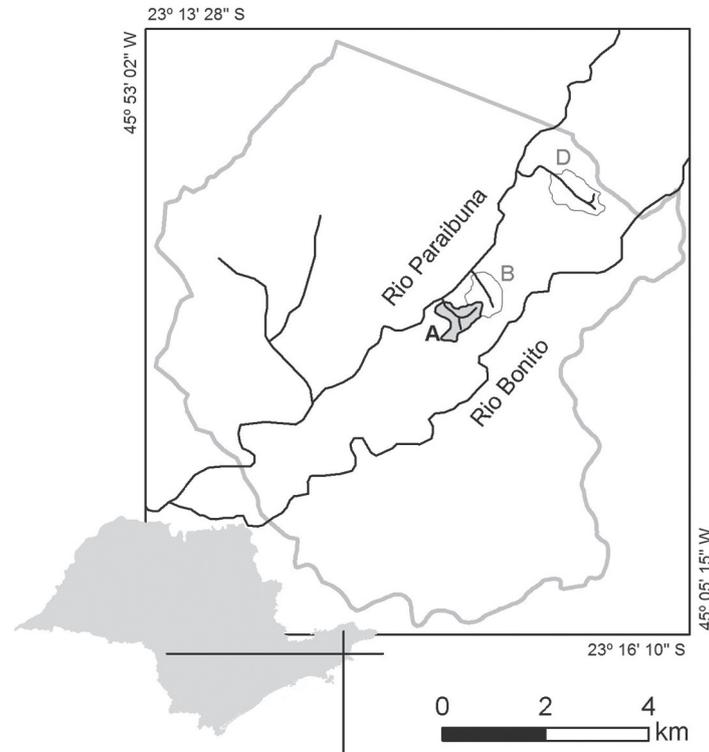


Figura 1. Localização do Laboratório de Hidrologia Florestal Walter Emmerich, no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha – SP, com mapa das microbacias experimentais. Em destaque a microbacia experimental A.

Figure 1. Location of the Cunha Forest Hydrological Laboratory and map of experimental small catchments. The catchment A is highlighted.

Conforme Luiz (2008) apud Cicco (2009), o tipo climático predominante é o Cwb, segundo a classificação de Köppen, ou seja, clima temperado chuvoso e moderadamente quente, com preponderância de chuvas em verões brandamente quentes. O período chuvoso estende-se de outubro a março, e o período menos chuvoso compreende os meses de abril a setembro (Cicco, 2004). A precipitação média anual é de 1.814 mm, com valores extremos de 1.422 mm e 2.505 mm, para o período de 1993 a 2006.

Furian e Pfeifer (1986) classificam os solos do Núcleo Cunha como Latossolo Vermelho Amarelo Fase Rasa, atualmente Latossolo Vermelho Amarelo câmbico (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 1999), provenientes de rochas duras,

orientadas e de difícil decomposição, como os gnaisses, migmatitos e granitos. Em consequência, é quimicamente pobre, ácido e relativamente raso; com textura grosseira e estrutura fraca, isto é, os grânulos formam uma massa homogênea com coerência muito fraca, que, aliados à elevada porosidade, lhe condicionam boa permeabilidade.

No Núcleo Cunha a vegetação é denominada Floresta Ombrófila Densa Montana (Mata Atlântica). Na microbacia A, a floresta primária foi parcialmente retirada no início de 1950, somente sendo preservada nos topos dos morros e em alguns trechos do fundo de vale. Com a criação do Parque Estadual da Serra do Mar em 1977, a vegetação está em processo de regeneração natural (Cicco, 2009).

2.2 Monitoramento Hidrológico

A precipitação foi obtida através de um pluviógrafo tipo caçamba, com capacidade de 0,5 mm, acoplado ao linígrafo do tipo flutuador, instalado no vertedouro da microbacia experimental A. Esse equipamento registra em papel, simultaneamente, a precipitação e a altura da lâmina d'água (cota), possibilitando, desta forma, visualizar o hidrograma.

O escoamento total foi medido na saída da microbacia, onde está localizada uma estação fluviométrica, composta de dois tanques, de sedimentação e de tranquilização, e ainda um vertedor triangular de ferro de 120° de abertura. As cotas (H) foram medidas continuamente num linígrafo e convertidas em vazão (Q), usando-se a curva-chave $Q = 0,0661.H^{2,303}$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9922.

2.3 Tratamento dos Dados

A partir das cartas de registros de chuva e cota do linígrafo procedeu-se a separação manual entre o escoamento de base e o direto, identificado pelo ponto de mudança abrupta do gradiente do braço de recessão do hidrograma, procedimento adotado pela Japan International Cooperation Agency – JICA (1986). O volume do escoamento de base foi obtido pela diferença entre os valores do escoamento total e do escoamento direto para cada evento de chuva. Também foram calculados o volume e a duração de todos os escoamentos. Para cada hidrograma foi determinada a duração da precipitação em minutos, seu total em mm, sua intensidade máxima (mm/h) e a chuva dos cinco dias antecedentes (mm).

Os escoamentos total, direto e de base de cada hidrograma foram calculados (mm e m³), assim como foram determinados a duração do hidrograma (minutos), a vazão de início (L/s), a vazão média do hidrograma (L/s), a vazão média das 24 horas antecedentes ao hidrograma (L/s), o pico de vazão (L/s), a proporção do escoamento (coeficiente de *runoff*) e a porcentagem do escoamento de base.

Para se obter a curva de duração de fluxo diário foram utilizados os dados de deflúvio do período de outubro de 2001 a setembro de 2006.

Utilizando-se o método descrito em Chang (1982), foram plotados em papel monologarítmico os valores de deflúvio diário nas ordenadas, contra o valor percentual de tempo correspondente no eixo das abscissas, variando do menor para o maior. Dessa forma, obteve-se o percentual de tempo em que o deflúvio diário foi igualado ou excedido.

2.4 Análise dos Dados

Os dados foram analisados através do pacote estatístico BioEstat 5.0 desenvolvido por Ayres et al. (2009), consistindo dos seguintes passos:

- (i) estatística descritiva dos dados;
- (ii) regressão linear simples que avaliou a relação entre a precipitação e o pico de vazão. Quando essa relação apresentou baixo coeficiente de determinação, uma nova variável foi construída, resultante do quociente entre a precipitação e o pico de vazão, pois, segundo García-Ruiz et al. (2005), é um modo de capturar a interação entre estas duas variáveis. Além disso, segundo esses autores, a separação dos dados possibilita melhor avaliação das diferenças entre os hidrogramas. Assim, os dados foram separados pela mediana e divididos em dois grupos (G1 e G2);
- (iii) teste *D'Agostino-Pearson* para verificar a normalidade dos dados das variáveis. Se o resultado apresentou significância, transformaram-se os dados em logaritmo da base 10. Dependendo da normalidade ou não dos dados, seguiram-se os passos (iv) ou (v);
- (iv) apresentando normalidade, aplicou-se o teste "t" de *Student* a fim de verificar as diferenças dos valores médios das variáveis entre os grupos;
- (v) não apresentando normalidade, aplicou-se o *Wilcoxon rank-test*, uma prova não paramétrica, e
- (vi) seleção de regressores (*Stepwise Regression*), método progressivo (*forward*), em que a cada passo foi incluída uma variável. Essa análise possibilita a escolha das variáveis preditoras que se relacionam com mais intensidade com a variável dependente. No presente caso, determinaram-se quais variáveis controlavam a magnitude do pico de vazão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A curva de duração de fluxo do deflúvio diário da microbacia A, para o período de cinco anos hídricos, está presente na Figura 2, com média de 2,97 mm e mediana de 2,42 mm. Para 90% do tempo de escoamento, o deflúvio diário foi

inferior a 5,0 mm, ou seja, predominando o escoamento de base. Para fluxos superiores a esse valor, ou seja, para 10% do tempo de escoamento, a curva apresentou uma inclinação acentuada que, de acordo com Chang (1982), denota maior contribuição do escoamento direto no deflúvio diário.

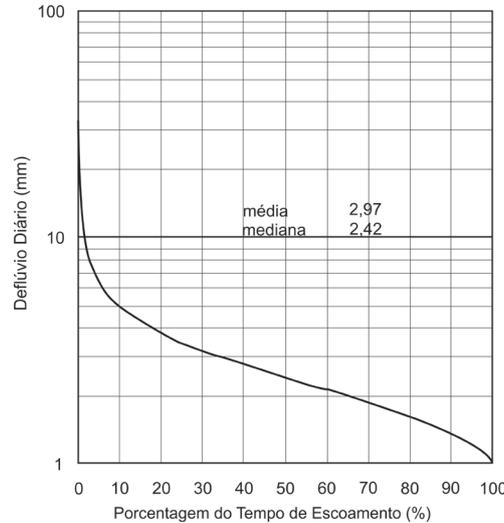


Figura 2. Curva de duração de fluxo do deflúvio diário da microbacia A, Cunha, SP, para o período de outubro de 2001 a setembro de 2006.

Figure 2. Flow frequency distribution for small catchment A, Cunha, SP. From October 2001 to September 2006.

Arcova (1996), estudando duas microbacias próximas à área de estudo, com superfície e vegetação semelhantes, encontrou valores para o escoamento total médio diário de 4,0 e 4,3 mm para as microbacias B e D, respectivamente. Esses fluxos mais altos, quando comparados com a microbacia A (2,97 mm), deveriam-se, dentre outros fatores, ao regime pluviométrico distinto entre os dois períodos estudados e, conseqüentemente, às taxas de evapotranspiração, como também às diferentes características físicas das microbacias.

Enquanto para o período de outubro de 1986 a setembro de 1992 a precipitação média anual foi de 2.013 mm para a microbacia B e de 2.159 mm para a microbacia D (Arcova, 1996), na microbacia A, para o período de outubro de 2001 a setembro de 2006, a precipitação média foi de 1.784 mm (Donato et al., 2007). Por outro lado, as perdas evaporativas foram superiores na microbacia A, da ordem de 698 mm anuais, contra 540 e 604 mm para as microbacias B e D, respectivamente. Assim, o menor índice pluviométrico, associado à maior perda evaporativa,

proporcionou à microbacia A menor quantidade de água armazenada no solo e, portanto, menor deflúvio médio diário.

Um total de cento e oitenta e oito hidrogramas ocorreu na microbacia A para os anos hídricos de 2005 e 2006. O fator de resposta médio foi de 0,083, ou seja, 8,3% da precipitação anual deixaram a microbacia através do escoamento direto. Em comparação, os fatores de resposta médios nas microbacias B e D foram de 23% e 12%, respectivamente (Arcova, 1996).

A relação mensal entre a precipitação e o escoamento direto mostrou que a maior parte não ultrapassou 10%, a exceção foi o mês de abril de 2005 (círculo em vermelho destacado dos demais), com 20%, quando choveu acima da média para o período menos chuvoso (Figura 3). Esse resultado foi semelhante àquele encontrado por Arcova (1996) para a microbacia D. No entanto, ambos diferiram da microbacia B, onde os valores percentuais do escoamento direto em relação à precipitação variaram entre 30% a 60% em inúmeros eventos (Arcova, 1996).

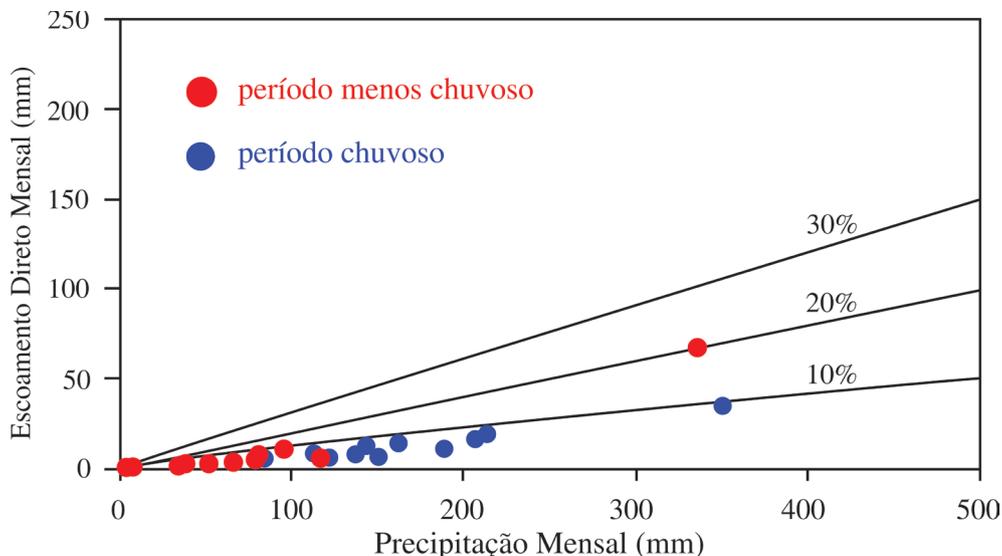


Figura 3. Relação entre as precipitações e os escoamentos diretos mensais na microbacia A, Cunha, SP, para o período de outubro de 2004 a setembro de 2006.

Figure 3. The relation between monthly rainfall and stormflow at small catchment A, Cunha, SP. From October 2004 to September 2006.

A Tabela 1 apresenta as classes, frequências e frequências relativas das precipitações nos períodos chuvoso e menos chuvoso da microbacia A. Não houve chuva nos cinco dias que antecederam os episódios em 22% dos hidrogramas ocorridos no período menos chuvoso. Por outro lado, para apenas 4% dos eventos no período chuvoso não ocorreram precipitações

nos cinco dias precedentes aos hidrogramas. No período menos chuvoso ocorreram 24 eventos de chuva na classe de > 0 – 20 mm, correspondendo a uma frequência relativa de 47%, enquanto para o período chuvoso as classes predominantes foram de > 0 – 20, 20 – 40, 40 – 60 e 60 – 80 mm, com frequências relativas variando de 19% a 22%.

Tabela 1. Distribuição de classes, frequência e frequência relativa das precipitações que antecederam em cinco dias os eventos selecionados para a análise dos hidrogramas gerados na microbacia A, Cunha – SP. Período de outubro de 2004 a setembro de 2006.

Table 1. Distribution of classes, frequency and relative frequency of rainfall preceding five days in the selected events for the analysis of the hydrographs generated in the small catchment A, Cunha, SP. From October 2004 to September 2006.

Classe (mm)	Período menos chuvoso		Período chuvoso	
	Frequência	Freq. relativa	Frequência	Freq. relativa
*	11	0,22	5	0,04
> 0 – 20	24	0,47	27	0,20
20 – 40	14	0,27	30	0,22
40 – 60	2	0,04	26	0,19
60 – 80			28	0,20
80 – 100			11	0,08
100 – 120			5	0,04
120 – 140			3	0,02
140 – 160			2	0,01

Obs.: * não houve precipitação nos cinco dias antecedentes à geração do hidrograma.

O valor máximo de precipitação foi de 269,5 mm, e o mínimo de 2,5 mm. A maioria das chuvas foi de pequena magnitude (cento e trinta menores que 15 mm e sete maiores que 40 mm), sendo que 91,0% dos hidrogramas tiveram o pico de vazão abaixo de 100 L/s, enquanto dez (5,3%) ultrapassaram 200 L/s.

A Figura 4 apresenta quatro exemplos de hidrogramas que ocorreram na microbacia A, com a sua correspondente distribuição de precipitação. Ela demonstra a variabilidade dos hidrogramas, muito simples em alguns casos ou com um padrão complexo em outros. As Figuras 4A e 4B apresentam a resposta do deflúvio à precipitação, após uma sequência de cinco dias sem chuva, sendo que a diferença no pico de vazão deveu-se ao volume precipitado. Na Figura 4C observa-se um primeiro

pico de vazão em resposta à precipitação de 16 mm, e na sequência um segundo pico, maior do que o primeiro, com precipitação dos cinco dias anteriores de 28 mm. Essa dinâmica mostra dois processos que contribuem para o escoamento direto (Dunne, 1978). O primeiro pico de vazão é originado do escoamento superficial saturado, através da água da chuva que se infiltra e alcança o lençol freático, aflorando à superfície nas áreas próximas aos cursos d'água. O outro processo inicia-se com a saturação dos horizontes permeáveis do solo, produzindo um fluxo lateral próximo à superfície do solo chamado escoamento subsuperficial (segundo pico de vazão). Finalmente, a Figura 4D corresponde a um evento chuvoso com três picos de intensidade que causou um hidrograma com três picos de vazão.

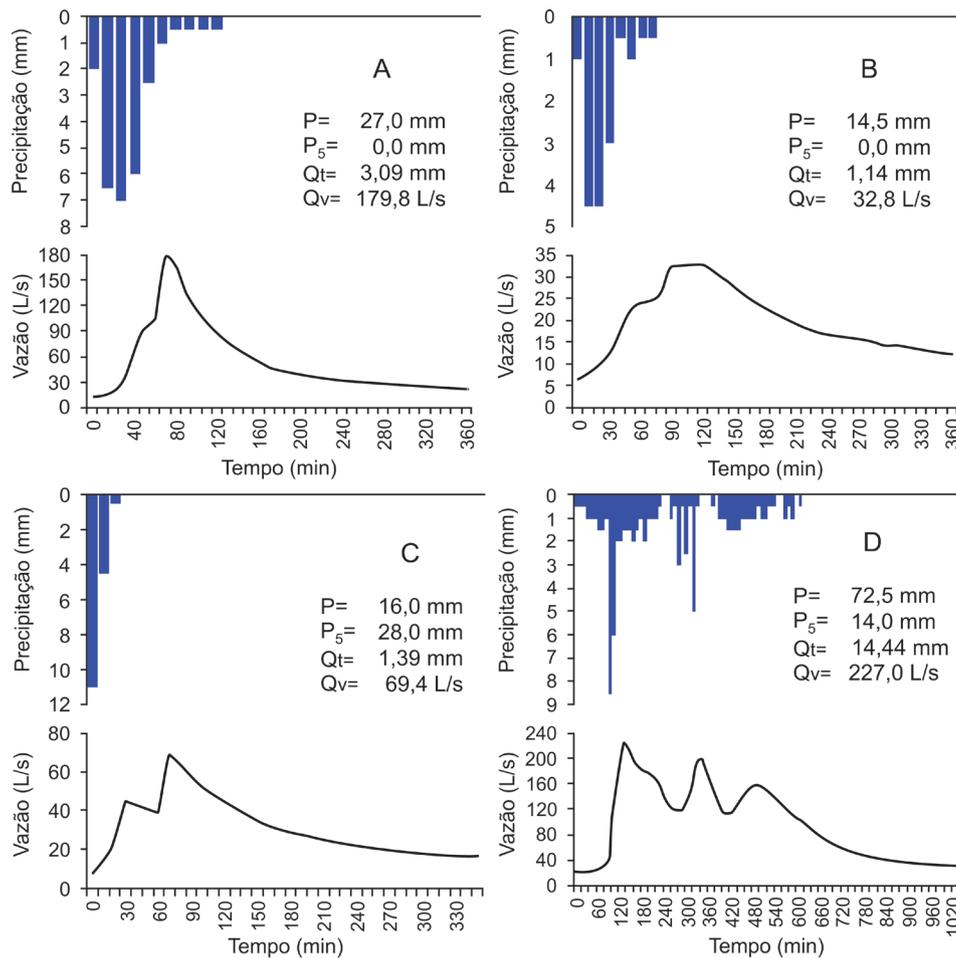


Figura 4. Exemplos de precipitação e deflúvio para eventos selecionados na microbacia A (P = precipitação; P₅ = precipitação dos cinco dias anteriores; Qt = escoamento total; Qv = pico de vazão).

Figure 4. Examples of rainfall and streamflow for selected storms in the small catchment A (P = rainfall; P₅ = rainfall five days before; Qt = total discharge; Qv = peak flow).

Em uma microbacia próximo à Mata Atlântica, Fujieda et al. (1997) e Ranzini et al. (2004) mostraram que o escoamento superficial hortoniano ocorre raramente, sugerindo que os escoamentos superficial saturado e subsuperficial predominam na microbacia A. Hewlett e Hibbert (1967) elucidaram que o escoamento direto, nessas condições, está sob a influência de uma área de origem dinâmica, conhecida como área variável de afluência (A.V.A.), e que normalmente representa apenas uma fração pequena da área total da microbacia.

De um modo geral, todos os hidrogramas apresentaram dependência entre sua forma e a distribuição da precipitação (hietograma).

Entretanto, o coeficiente de determinação entre a precipitação total e o pico de vazão foi baixo ($R^2 = 0,485$). A Figura 5 mostra que a maioria dos pontos está dispersa, longe da linha de regressão, indicando que a resposta do pico de vazão à precipitação está sendo controlada por outros fatores, além da quantidade total de chuva. De fato, observa-se que precipitações de mesma intensidade podem apresentar picos de vazão diferentes. Por exemplo, precipitações de 20 mm podem gerar picos de vazão que variam de 50 L/s a 300 L/s.

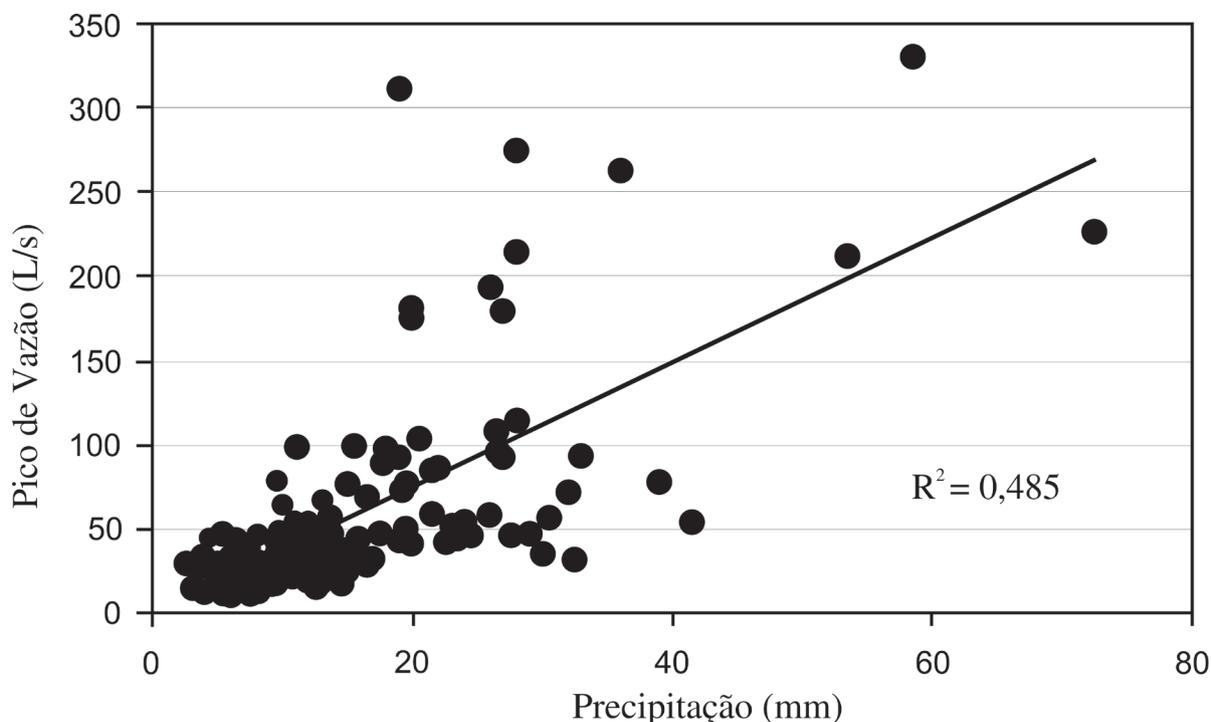


Figura 5. Regressão entre a precipitação e o pico de vazão na microbacia A.

Figure 5. Relationships between peak flow and precipitation at small catchment A.

Em razão do baixo coeficiente de determinação entre a precipitação total e o pico de vazão, procurou-se, através de uma análise detalhada dos dados, entender esta relação. Adotando-se a metodologia proposta por García-Ruiz et al. (2005), foi construída uma nova variável resultante do quociente entre a precipitação e o pico de vazão. Dessa forma, foi possível, através da mediana,

separar em dois grupos, um com respostas rápidas do pico de vazão a qualquer precipitação (G1) e o outro com respostas mais lentas (G2). Com a separação em grupos houve um acréscimo do coeficiente de determinação das regressões, para o G1 de 0,71 e o G2 de 0,78. Os coeficientes de regressão foram 5,6 (G1) e 2,3 (G2), mostrando respostas diferentes do pico de vazão para uma mesma precipitação (Figura 6).

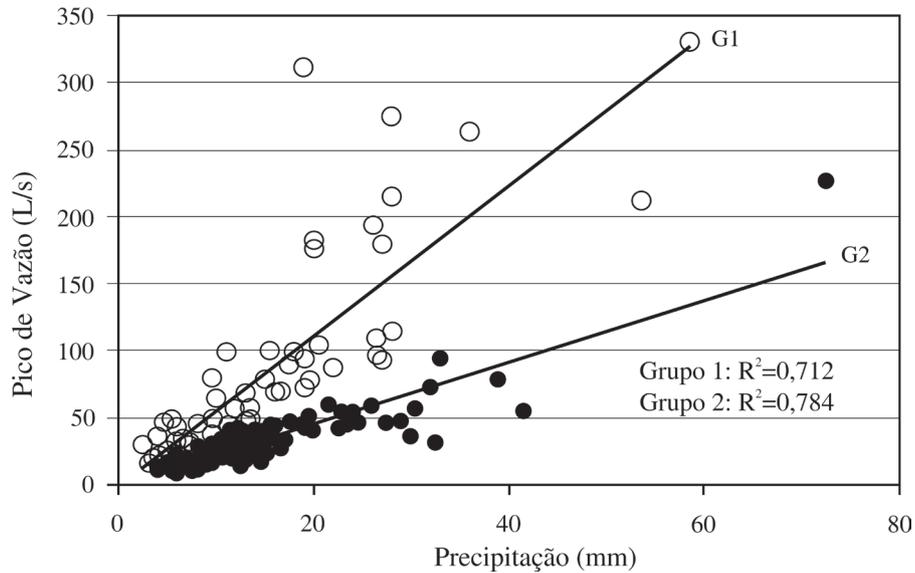


Figura 6. Regressões entre a precipitação e o pico de vazão em dois grupos, na microbacia A.

Figure 6. Relationships between peak flow and precipitation, distinguishing two groups of floods, at small catchment A.

Para avaliar a significância das diferenças entre as variáveis dos grupos foram realizados testes estatísticos (Tabela 2). Observou-se que quase todas as variáveis contribuíram para explicar as diferenças entre os grupos. Por um lado, a precipitação de G1 (12,95 mm) foi pouco inferior a G2 (15,05 mm), apesar de estatisticamente diferentes. Por outro, o pico de vazão de G1 (70,91 L/s) foi mais que o dobro de G2 (33,80 L/s).

Isso pode ser compreendido quando se analisa a precipitação dos cinco dias anteriores (G1: 49,65 mm; G2: 22,45 mm), a vazão inicial (G1: 20,30 L/s; G2: 12,01 L/s), o coeficiente de *runoff* (G1: 0,07; G2: 0,04), e a vazão média das 24 horas anteriores (G1: 25,08 L/s; G2: 14,27 L/s), mostrando que as condições do solo da microbacia A, que antecederam os eventos, de G1 possuíam maior umidade do que os eventos de G2.

Tabela 2. Valores médios e significância dos testes estatísticos das variáveis dos grupos G1 e G2.

Table 2. Average values and statistical tests for variables of G1 and G2 floods.

Variável	G1	G2	<i>p</i>	
Precipitação (mm)	12,95	15,05	0,0208*	(a)
Pico de vazão (L/s)	70,91	33,80	< 0,0001*	(a)
Intensidade máxima (mm/h)	10,34	9,59	0,9314 n.s.	(a)
Precipitação dos cinco dias antecedentes (mm)	49,65	22,45	< 0,0001*	(b)
Vazão inicial (L/s)	20,30	12,01	< 0,0001*	(b)
Duração da precipitação (min)	230,68	377,61	0,0023*	(b)
Duração do hidrograma (min)	407,53	528,94	0,0013*	(a)
Coefficiente de <i>runoff</i>	0,07	0,04	< 0,0001*	(a)
Deflúvio do hidrograma (m ³)	936,98	823,60	0,0086*	(a)
% Escoamento de base	0,68	0,71	0,1921 n.s.	(a)
Vazão média das 24 horas anteriores (L/s)	25,08	14,27	< 0,0001*	(b)
Vazão média do hidrograma (L/s)	38,05	22,46	< 0,0001*	(a)

Obs.: *nível de significância: 5%; n.s. não significativo; (a) teste t de *Student*; (b) *Wilcoxon rank-test*.

Uma análise de regressão linear passo a passo, método progressivo (*stepwise regression, forward method*) foi realizada para determinar as variáveis que controlaram a magnitude do pico de vazão em cada grupo (Tabela 3). Nessa análise foram selecionadas cinco variáveis, a precipitação (P), a intensidade máxima (Int. máx.),

a precipitação dos cinco dias antecedentes (P_5), a vazão média das 24 horas antecedentes (Q_{24}) e a vazão inicial (Q_i). As duas primeiras variáveis foram relacionadas com o volume e a intensidade da chuva, e as outras três foram indicadoras das condições que antecederam os eventos.

Tabela 3. Regressão linear passo a passo (método progressivo) para os grupos G1 e G2, tendo como variável dependente Y o pico de vazão, e como variáveis independentes X a precipitação (P), a intensidade máxima (Int. máx.), a vazão inicial (Q_i), a vazão média das 24 h antecedentes (Q_{24}), e a precipitação dos cinco dias antecedentes (P_5) (R^2 = coeficiente de determinação e GL = graus de liberdade).

Table 3. Stepwise regression (forward) for groups G1 and G2, as dependent variable Y the peak flow, and independent variables X the precipitation (P), the maximum intensity (Int. máx.), initial base flow (Q_i), the discharge 24 hrs before (Q_{24}), and the precipitation five days before (P_5) (R^2 = coefficient of determination and GL = degrees of freedom).

Grupo	Variável independente incluída	R^2	Variação R^2	GL	F	p-valor	QM Erro
G1	P	71,29%	71,29%	1,83	206,087	0,0000	1328,9201
	P, Int. máx.	72,77%	1,48%	2,82	109,581	0,0000	1275,6341
	P, Int. máx., P_5	72,78%	0,01%	3,81	72,197	0,0000	1290,9407
	P, Int. máx., P_5 , Q_i	73,64%	0,86%	4,80	55,866	0,0000	1265,9536
	P, Int. máx., P_5 , Q_i , Q_{24}	73,64%	0,01%	5,79	44,146	0,0000	1281,7345
G2	P	78,42%	78,42%	1,83	301,538	0,0000	156,7857
	P, Int. máx.	83,08%	4,66%	2,82	201,291	0,0000	124,4170
	P, Int. máx., Q_i	86,32%	3,24%	3,91	170,339	0,0000	101,8383
	P, Int. máx., Q_i , Q_{24}	86,34%	0,03%	4,80	126,460	0,0000	102,9126
	P, Int. máx., Q_i , Q_{24} , P_5	86,36%	0,01%	5,79	100,003	0,0000	104,1256

Pela análise dos resultados verificou-se que a variável precipitação foi responsável por 71,29% do coeficiente de determinação (R^2) do grupo G1 e por 78,42% do G2, enquanto as demais variáveis (intensidade máxima, vazão inicial, vazão média das 24 horas anteriores e precipitação dos cinco dias antecedentes) acrescentaram apenas 2,36% a este coeficiente para o G1 e 7,94% para o G2, totalizando ao final 73,64% e 86,36%, respectivamente. O coeficiente F aponta para a variável precipitação, tanto para G1 quanto para G2, como a que obteve o valor mais elevado (206,087 e 301,538, respectivamente). O p -valor foi estável e igual a zero até quatro casas decimais para ambos os grupos, indicando que em qualquer combinação haverá rejeição da hipótese de nulidade. Observando o Quadrado Médio do Erro do G1, constatou-se que o modelo melhor representado foi composto pelas variáveis precipitação, intensidade máxima, precipitação dos cinco dias antecedentes

e vazão inicial, cujo Quadrado Médio do Erro (1265,9536) foi o menor entre as simulações realizadas pelo programa. No caso do G2 o Quadrado Médio do Erro foi de 101,8383 e, portanto, o melhor modelo incluiu as variáveis precipitação, intensidade máxima e vazão inicial.

Esses resultados sugerem que a precipitação e sua intensidade são fatores importantes para explicar a forma e a altura do hidrograma. Todavia, a umidade antecedente do solo, que tem uma estreita relação com a vazão no início do hidrograma e a precipitação dos cinco dias antecedentes, contribuiu com a intensidade do deflúvio da microbacia A. Resultados similares foram encontrados por Noguchi et al. (1997) em microbacia coberta por floresta tropical na Malásia, onde o escoamento direto foi influenciado pelas condições de umidade antecedente do solo representada pela vazão no início do hidrograma.

4 CONCLUSÕES

O deflúvio médio diário da microbacia A foi de 2,97 mm, sendo que 90% do tempo manteve-se inferior a 5 mm. O escoamento de base foi o principal componente do deflúvio, com 91,7%, enquanto o escoamento direto contribuiu com 8,3%.

A análise dos hidrogramas mostrou que existe uma relação entre sua forma e a precipitação (hietograma), sugerindo que os escoamentos superficial saturado e subsuperficial predominam na microbacia. Entretanto, a relação entre a precipitação e o pico de vazão foi fraca, relação esta que melhorou significativamente após a separação dos hidrogramas em dois grupos, de acordo com o valor do quociente entre a precipitação e o pico de vazão.

No primeiro grupo (G1) ficaram os eventos cujos picos de vazão são nitidamente maiores quando se aumentam os valores de precipitação. A contribuição do escoamento de base foi relativamente pequena, com o escoamento direto dominando o hidrograma e a área variável de afluição (A.V.A.). No segundo (G2), o acréscimo na precipitação produziu um pequeno aumento no pico de vazão, mesmo durante as chuvas mais intensas. Isso sugere que a A.V.A. ocupou uma menor parte da microbacia, próxima ao curso d'água. A diferença da resposta entre os grupos relacionando o pico de vazão e a precipitação foi devida, principalmente, à umidade antecedente do solo.

5 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida ao segundo autor, e ao técnico de apoio João Batista Amaro dos Santos (Instituto Florestal de São Paulo) sem o qual este trabalho não teria sido possível. Os autores agradecem as sugestões e comentários dos analistas anônimos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, v. 291, p. 1-27, 2004.

ANIDO, N.M.R. **Caracterização hidrológica de uma microbacia experimental visando identificar indicadores de monitoramento ambiental**. 2002. 69 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ARCOVA, F.C.S. **Balço hídrico, características do deflúvio e calibragem de duas microbacias hidrográficas na Serra do Mar, SP**. 1996. 155 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

AYRES, M. et al. **BioEstat**: aplicações estatísticas nas áreas das ciências bio-médicas. Versão 5.0. Belém: Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, 2007. 364 p. Disponível em: <<http://mamiraua.org.br/download/index.php?dirpath=./BioEstat%205%20Portugues&order=0>>. Acesso em: 6 jan. 2009.

BATES, C.G.; HENRY, A.J. Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado. **Monthly Weather Review Supplement**, v. 30, p. 1-79, 1928.

CHANG, M. **Laboratory notes forest hydrology**. Nacogdoches: School of Forestry, Stephen F. Austin State University, 1982. 203 p.

CICCO, V. **Análise de séries temporais hidrológicas em microbacia com cobertura vegetal natural de Mata Atlântica, Cunha-SP**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

_____. **Determinação da evapotranspiração pelos métodos dos balanços hídrico e de cloreto e a quantificação da interceptação das chuvas na Mata Atlântica: São Paulo, SP e Cunha, SP**. 2009. 138 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DONATO, C.F. et al. Balço de massa em microbacia experimental com Mata Atlântica, na Serra do Mar, Cunha, SP. **Rev. Inst. Flor.**, v. 20, n. 1, p. 1-11, 2008.

DUNNE, T. Field studies of hillslope flow processes. In: KIRKBY, M.J. (Ed.). **Hillslope hydrology**. Chichester: John Wiley, 1978. cap. 7, p. 227-93.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: EMBRAPA Produção de Informação, 1999. 412 p.

FUJIEDA, F. et al. Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 196, p. 26-46, 1997.

FURIAN, S.M.; PFEIFER, R.M. Levantamento de reconhecimento do meio físico do Núcleo Cunha, SP. **Bol. Técn. IF**, v. 40, n. 2, p. 183-193, 1986.

GARCÍA-RUIZ, J.M. et al. Runoff generation in an intensively disturbed, abandoned farmland catchment, Central, Spanish Pyrenees. **Catena**, v. 59, p. 79-92, 2005.

HEWLETT, J.D. **Principles of forest hydrology**. Athens: The University of Georgia Press, 1982. 183 p.

_____; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY, 1., 1967, Oxford. **Annals...** Oxford: Pergamon Press, 1967. p. 275-90.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY – JICA. **Synthetic report of the Japanese Technical Cooperation Project for the forestry research in São Paulo, Brazil**. [S.l.], 1986. 555 p.

NOGUCHI, S. et al. Rainfall-runoff responses and roles of soil moisture variations to the response in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia. **Journal of Forest Research**, v. 2, n. 3, p. 125-132, 1997.

RANZINI, M. et al. Processos hidrológicos de uma microbacia com Mata Atlântica, na região da Serra do Mar, SP. **Scientia Forestalis**, n. 66, p. 108-119, 2004.