

Comportamento Hidrológico de Áreas Urbanas Impermeabilizadas Diretamente Conectadas e Total

Ademir Paceli Barbassa

Programa de Pós-Graduação em Eng. Urbana – Universidade Federal de São Carlos
barbassa@ufscar.br

João Batista Neto de Campos

Fundação Getúlio Vargas - FGV Projetos
urbegaia@terra.com.br

Recebido: 11/08/09 - revisado: 22/08/10 - aceito: 13/09/10

RESUMO

Áreas impermeabilizadas têm peso hidrológico significativo na resposta das bacias urbanas pelo seu elevado percentual, causando aumento do volume de escoamento superficial direto, da velocidade e da vazão de pico. Tem sido de interesse estudar sua quantificação e usá-la como balizador ou mesmo como parâmetro de modelos de previsão. Neste trabalho enfocase o comportamento destas áreas a partir de hietogramas e hidrogramas medidos, sendo a relação destes volumes representada por modelo linear ou percentual. Após considerações hidrológicas para obtenção do modelo linear, abordaram-se, com certo detalhe, experiências italianas, francesas, norte-americanas e australianas. Nelas os coeficientes angulares e os interceptos foram usados, respectivamente, para estimar o percentual de área impermeabilizada e as perdas hidrológicas iniciais nestas áreas da bacia. Estes percentuais, obtidos por regressão, foram relacionados aos percentuais “reais” de áreas impermeabilizadas total ou diretamente conectada medidas em mapa. Discutiram-se os fatores físicos e aleatórios sobre valores medidos. Apresentaram-se resultados de monitoramento experimental, em Bertioga – SP, de chuva e vazão em lotes urbanos de 360 m², sob uso “residencial”, com 75% de área impermeável e outro natural, ambos em solo com areia predominantemente fina. Verificou-se que para o lote convencional, a regressão linear entre precipitação efetiva e precipitação total para 15 eventos registrados resultou em coeficiente de determinação R² de 0,89. O coeficiente angular do modelo linear, também entendido como o coeficiente de precipitação efetiva, ficou muito próximo do percentual impermeabilizado do lote.

Palavras-chaves: áreas impermeabilizadas, áreas impermeabilizadas diretamente conectadas, coeficiente de escoamento superficial, drenagem urbana.

INTRODUÇÃO

O comportamento de bacias hidrológicas diante de um evento climatológico, depende de suas características fisiográficas, como rede de canais, topografia, geologia, uso e ocupação, existência de dispositivos de controle e aproveitamento dos recursos hídricos, variabilidade espacial e temporal de precipitação, além da umidade antecedente.

Modelos hidrológicos tentam representar as fases do ciclo hidrológico na bacia, de forma simplificada, para conseguir alguma previsibilidade diante de fenômenos tão complexos com tantas variáveis envolvidas.

Uma simplificação ainda maior do modelo consiste em diferenciar as áreas da bacia em permeáveis e impermeabilizadas. Este último enfoque a-

briu, com sucesso, o estudo de áreas impermeabilizadas. Nelas muitos fenômenos importantes em áreas permeáveis como infiltração, deixam de sê-lo, não por inexistirem, mas por perderem suas influências na resposta da bacia.

Há diversos métodos para quantificação das áreas impermeabilizadas (Ai's), seja a partir de aerofotos, de plantas, de sensoriamento remoto, de visitas de campo, de base de dados de Prefeituras etc. Outro aspecto é a sua influência na definição do coeficiente de escoamento superficial do método mais empregado de previsão de enchentes, o Método Racional, além da importância para outros modelos de previsão de enchentes.

Um terceiro enfoque é a análise destas áreas impermeabilizadas a partir de registros observados de alturas pluviométricas e vazões. Elas são formadas por áreas impermeabilizadas diretamente conecta-

das (a_{idc}) e não diretamente conectadas (a_{inc}). Podem ser identificadas a partir de dados hidrológicos e ou usando os recursos já mencionados.

Neste artigo abordaram-se trabalhos históricos que envolveram as A_i 's e outros mais recentes, que analisaram representativos eventos em número, em amplitude e em dimensões de bacias. Sob a mesma ótica discutiram-se resultados de monitoramento de chuva e vazão em lotes urbanos sob diferentes usos e ocupação.

COEFICIENTES DE ESCOAMENTO

Define-se coeficiente de precipitação efetiva (ϕ) como a relação entre os volumes escoado e precipitado, a qual pode ser calculada para cada evento em uma bacia (Ciapone et al, 1989,1996). Esta característica de ϕ o diferencia do coeficiente de escoamento superficial (C) do método Racional, pois embora C englobe ϕ , C é um parâmetro adotado a partir das hipóteses de formulação do modelo (Viessmann et al, 1989; Larcán et al 1987).

Neste enfoque interessa saber o papel destas áreas na geração do volume de escoamento superficial, não sua distribuição temporal ou espacial, o que requereria a abordagem de modelos mais sofisticados.

O volume precipitado (V_{pre}) pode ser calculado a partir de hietograma de chuva $I(t)$ medido, com consideração de uniformidade na bacia. O volume escoado total resulta do hidrograma $Q(t)$, também medido, representando a soma das contribuições das áreas impermeabilizadas diretamente conectada (V_{aidc}), da área permeável (V_{ap}) e da área impermeabilizada não conectada (V_{ainc}), cujo escoamento passa por área permeável vizinha. A equação 1 expressa esta relação volumétrica.

$$\phi = \frac{\int_0^t Q(t)dt}{\int_0^t I(t)dt} = \frac{V_{aidc} + V_{ainc} + V_{ap}}{V_{pre}} \quad (1)$$

A área impermeabilizada total urbana (A_i) é fundamental no cálculo do volume escoado, devido ao seu percentual na área total da bacia (A).

Segundo Campana e Tucci (1994) a impermeabilização em regiões metropolitanas pode atingir até 70%, conforme medidas usando aerofotos. Para áreas centrais e intermediárias de cidade média/pequena e, sem considerar os arruamentos, pode variar de 71,7 a 77,6%, conforme Fontes e Barbassa (2003). As A_i 's interferem nas característi-

cas do hidrogramas, além das perdas hidrológicas iniciais.

A parcela V_{aidc} é produto da área impermeabilizada diretamente conectada (a_{idc}) e precipitação efetiva da área (hef_{aidc}). A precipitação efetiva é obtida deduzindo-se da altura precipitada (h), as perdas hidrológicas devido, essencialmente, às depressões superficiais.

Valores de lâminas armazenadas nas depressões de áreas impermeabilizadas tipicamente variam: de 0,5 a 2mm segundo Butler e Davies (2004); Tholin e Kiefer (1960) usaram valor 1,6 mm para pavimentos; Kidd (1978) observou que as alturas armazenadas (S_i) variaram, para as bacias de até 1,8 ha, entre 0,5 a 1,6 mm e foram altamente correlacionadas com a declividade (I) da bacia. O mesmo autor apresentou a equação: $S_i = 0,0303 \cdot I^{-0,49}$ com coeficiente de correlação R igual a 0,85.

O tipo de função que representa os volumes retidos nas depressões pode impor que elas sejam totalmente preenchidas antes de iniciar o escoamento. O escoamento pode também iniciar com a chuva e crescer até preencher as depressões se a função for exponencial, segundo Linsley et al (1949), ou for a função normal acumulada como propôs Tholin e Keifer (1960). Neste artigo interessa o volume, então usa-se o modelo em que admitem-se preenchidas as depressões para cálculo do V_{aidc} , como a equação 2.

$$V_{aidc} = a_{idc} \cdot hef_{aidc} = a_{idc} \cdot \left[\int_0^t I(t) \cdot dt - S_i \right] \quad (2)$$

Na equação 2 S_i é a lâmina média retida nas irregularidades. Esta equação pode ser simplificada no caso em que a altura precipitada (h) exceda a capacidade de retenção nas irregularidades (S_i), tem-se.

$$V_{aidc} = (h - S_i) \cdot a_{idc} \quad (3)$$

O volume de escoamento gerado em áreas não conectadas, V_{ainc} , é o mais difícil de estimar, pois ele resulta não somente da precipitação, mas do volume escoado dela, V_{esc} , para as áreas permeáveis vizinhas. O valor de V_{esc} depende do escoamento ser pontual ou distribuído, das características de solo, da compactação, proximidade da rede de drenagem e etc. Analogamente às a_{idc} 's, ou seja, supondo preenchidas as irregularidades superficiais, estima-se o V_{ainc} como se segue.

$$V_{ainc} = (h - S_i) \cdot a_{inc} - V_{esc} \quad (4)$$

O volume escoado para outras bacias, Vesc, depende diretamente do percentual destas áreas impermeabilizadas não conectadas na bacia. Segundo Garotti et al (2007), os percentuais de ainc's em cidades de porte médio/pequeno variam de 2,3 a 15% para lotes até 600 m² em São Carlos – SP, e de 0,6 a 11,6 % em Ribeirão Preto – SP. Devido ao seu baixo percentual, caso se despreze o volume Vesc, a equação 4 deverá ter sua representatividade reduzida, porém limitadamente.

O volume do escoamento superficial de áreas permeáveis (Vap) reduz-se em boa parte devido à infiltração, e considera-se também a retenção nas depressões. As lâminas armazenadas nas depressões podem variar tipicamente de 2,5 a 7,5 mm e superar 10 mm para jardins, conforme Butler e Davies (2004). A infiltração é influenciada por diversos fatores como tipo e uso dado ao solo, umidade antecedente etc. Admite-se que depois de satisfeitas as necessidades de infiltração do solo, passa-se a preencher as depressões superficiais. A altura efetiva na área permeável é obtida deduzindo-se da altura precipitada as parcelas infiltrada e retida. O volume Vap é o produto da área permeável (ap) pela altura efetiva hef_{ap}, como equação 5.

$$V_p = ap.hef_p = ap. \left[\int_0^t [I(t) - f(t)]dt - S_{ap} \right] \quad (5)$$

Na equação 5, f(t) é a taxa de infiltração no tempo t, que pode ser calculada por equações como Horton, Philip, Green e Ampt. São necessários cuidados no cálculo de f(t) para não ultrapassar a capacidade de infiltração do solo, nem a altura precipitada, porém este tratamento foge do escopo deste trabalho, por pretender-se um modelo concentrado. Admitiu-se que a retenção nas depressões de áreas permeáveis S_{ap} seja constante.

Com as hipóteses estabelecidas e substituindo as equações 3, 4 e 5 na equação 1, segue-se.

$$\phi = \frac{(h - S_i).(aidc + ainc) + ap.hef_{ap}}{h.A} \quad (6)$$

No caso em que a contribuição ao sistema de drenagem seja de áreas impermeabilizadas (aidc e ainc) e rearranjando a equação 6 obtém-se:

$$\phi.h = hef = \frac{(aidc + ainc)}{A}.h - \frac{(aidc + ainc)}{A}S_i \quad (7)$$

$$hef = B.h + \text{Intercepto} \quad (8)$$

As equações 7 e 8 são denominadas de modelo linear ou percentual. Os valores de B e do Intercepto na equação 8 podem ser calculados por regressão linear para cada bacia, desde que se disponha de uma série de eventos de chuva e vazão.

O coeficiente angular B corresponde então a (aidc+ainc)/A, ou seja, ao percentual de áreas impermeabilizadas. Na hipótese de o escoamento superficial ser gerado predominantemente nas áreas conectadas, B corresponderá à aidc/A. O Intercepto possibilita calcular o armazenamento nas depressões destas superfícies.

Observe-se pela equação 8, que se as perdas iniciais Si forem zero, ou se forçar o Intercepto a zero durante a regressão linear, B corresponderá também a um coeficiente de precipitação efetiva calculado, denominado ϕ_{calc} .

A relação entre B e aidc/A ou B e (aidc+ainc)/A, assim como o cálculo das perdas iniciais Si, a partir do Intercepto foram analisados para dezenas de bacias estrangeiras e para o caso de lotes experimentais brasileiros monitorados.

O uso de volumes e as simplificações impostas permitiram chegar ao modelo linear, entretanto contribuições das áreas permeáveis existem, bem como a influência das ainc's e de fatores aleatórios, os quais podem interferir na representatividade do modelo, como se procura discutir na sequência.

PROPOSIÇÕES E VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS de ϕ e C

No início do século XX o modelo britânico do Método Racional adotava C como a fração de aidc na bacia, conforme Lee e Heaney (2003).

$$C = aidc/A \quad (9)$$

Na mesma época na Itália, Fantoli (1904), segundo Ciaponi et al (1989), baseando-se em sua experiência e em uma pequena rede de drenagem em Milano, propôs a equação (10) para cálculo de coeficiente de precipitação efetiva.

$$\phi = K . h^{1/3} \quad (10)$$

A variável K é uma constante que depende das características da bacia e da altura da precipitação h, para chuva de uma hora de duração. A equação 10 é usada de forma incorreta se não forem observadas as restrições e ainda, se ϕ superar o valor

de 0,75, pois sua dependência altera-se com a altura de chuva.

Shaake et al (1967) propuseram a equação 11 para estimativa do coeficiente de escoamento C.

$$C = 0,14 + 0,65 \cdot A_i + 0,05 I \quad (11)$$

Na equação 11, C é um parâmetro do método Racional e função do percentual área impermeabilizada total da bacia (A_i) e da declividade do coletor principal (I) da rede de drenagem, também em percentagem.

Desbordes (1975) analisou dados de 6 bacias francesas e 111 eventos, com áreas impermeabilizadas de 22 a 100%, áreas totais de 1,5 a 5,5 ha e alturas inferiores a 50 mm. Investigou adicionalmente outras 4 bacias norte-americanas com 55; 68; 52 e 44% de áreas impermeabilizadas e áreas totais de 5,2; 9,4; 19,1 e 925 ha e chuvas inferiores a 40 mm. A regressão linear entre alturas efetiva e precipitada apresentou coeficiente de correlação R superior a 0,92 para as bacias francesas, não sendo apresentados para as americanas. A relação entre os coeficientes angulares e o percentual de área impermeabilizada para as 10 bacias é a seguinte:

$$B = 1,01 (A_i/A) - 0,12 \quad (12)$$

O autor admite que a equação 12, nos casos em que a impermeabilização seja superior a 20%, pode ser simplificada para $B = A_i/A$. Para rápida avaliação C pode ser igualado a A_i/A , como outros autores o fazem.

As perdas iniciais médias calculadas a partir do valor do intercepto da equação 12, para as bacias estudadas variaram entre 0,42 e 4,6 mm.

Jacobsen e Harremoës (1981) monitoraram área de 682 m² com concreto asfáltico impermeável obtendo a relação entre os volumes escoados e precipitados: $h_{ef} = 0,984 h - 0,424$ e coeficiente de correlação de 0,998. As alturas registradas foram menores que 10 mm e com a bacia inicialmente sem chuva. A mesma área com pavimento semipermeável apresentou comportamento completamente diferente.

Para efeito de projeto Larcan et al (1987), baseados em seis bacias experimentais, propuseram a expressão que se segue:

$$\phi = A_i + Cap (1 - A_i) \quad (13)$$

Na equação 13 Cap é o coeficiente de escoamento da área permeável, que depende de diversos fatores, dificultando o seu uso.

Ciapone e Papiri (1989) investigaram a dependência do coeficiente de precipitação efetiva (ϕ) com características da superfície e da precipitação. Dispunham de 17 bacias experimentais: 2 do Canadá, 4 dos EUA, 1 da Austrália, 1 da Dinamarca, 1 da França, 2 da Inglaterra, 1 da Hungria, 1 da Itália, 2 da Eslovênia, 1 da Iugoslávia e 1 da Noruega, com declividades variando de 0,1% a 6%, 14 bacias de 2 a 25 ha e 3 bacias médias, com áreas de 70, 156 e 253 ha, sendo 3 bacias com áreas impermeabilizadas diretamente conectadas menores que 20%, 12 bacias entre 30 e 50% e 2 com 80% ou mais. Não contaram com bacias com impermeabilização entre 50 e 80%.

Os eventos foram separados em três conjuntos: o primeiro com o total de 275 eventos; o segundo com 116 eventos com alturas maiores que 5 mm e intensidades maiores que 2,5 mm/h; o terceiro formado por 58 eventos com alturas maiores que 10 mm e intensidades superiores a 5 mm/h.

Os três conjuntos de eventos foram representados por modelos lineares, com a variável dependente ϕ em função dos percentuais de área impermeabilizada total (A_i) e de áreas permeáveis ($1 - A_i$): $\phi = F (A_i/A) + G (1 - A_i/A)$. As constantes F e G obtidas por regressão. Estas modelagens apresentaram erros médios maiores que 39%.

Nestes modelos a variável explicativa (a_i/A) é uma característica da bacia, não varia de evento a evento, diferentemente da equação 8, além do que não considera a conexão de áreas impermeabilizadas.

Os mesmos autores estimaram, com os três conjuntos de dados, a dependência da vazão às seguintes características da bacia: área impermeabilizada diretamente conectada (a_{idc}); área impermeável não conectada à rede de drenagem (a_{inc}); área total da bacia (A); área permeável (a_p); declividade da bacia (I) e as características da precipitação: altura (h) e duração (t).

Destas possíveis representações por regressão múltipla, resultou que a equação 14, ajustada ao conjunto de 58 dados, apresentou os melhores resultados: coeficiente de regressão múltipla de 0,858, erros percentuais médios de 6,6%, quadráticos de 42%, máximo de 165% e mínimo de -54%.

$$\phi = 0,25 \cdot a_{idc}^{0,68} \cdot h^{0,34} \quad (14)$$

A equação 14, entretanto, é limitada à a_{idc} menor que 0,75 e h menor que 100 mm, caso contrário ϕ resulta maior que 1. Observa-se que o expoente de h desta equação é semelhante ao da equação 10. Os autores realizaram outra modelagem

impondo restrições a ϕ de 0 a 1, com ϕ tendendo a 1 se aidc tende 100% e/ou h tende a infinito. A qualidade do ajuste do modelo decresceu sensivelmente.

A relação entre volumes escoados e precipitados, equação 8, foi usada para calcular as perdas hidrológicas iniciais e o tipo de superfície por vários autores. Algumas destas análises são abordadas na sequência.

Boyd et al (1993) investigaram a relação entre h_{ef} e h baseando-se em dados hidrológicos de 763 eventos em 26 bacias. O uso foi residencial em 23 bacias e comercial/industrial em 3. Dois tipos de comportamento foram evidenciados, como se segue. Bacias com escoamentos predominantes de áreas impermeabilizadas:

Em 17, das 26 bacias, os gráficos (h_{ef} contra h) indicaram que as relações tenderam a uma reta, conforme equação 8. Em geral, os coeficientes de correlação foram superiores a 0,939; apenas em uma bacia constatou-se o valor de 0,844. Houve pequeno espalhamento e somente poucos valores de h_{ef} acima da reta de regressão. Estas bacias têm áreas entre 1,73 e 25,5 ha, exceto uma com 235,5 ha. Em 12 destas bacias as alturas de chuva foram menores que 44,7mm, em 4 menores que 59mm e em uma bacia, foram menores que 227mm.

Como exemplo mostra-se na figura 1 o gráfico com dados da bacia Fort Lauderdale – USA, com 7,7 ha de área 100% urbana e com a porcentagem de 98% de área impermeabilizada e diretamente conectada. O valor de B que representa o ϕ_{cal} (ϕ calculado) foi igual a 0,957 e a perda hidrológica obtida igual a 1,33 mm.

Isto indica geração de escoamento superficial em áreas permeáveis foi quase nula.

Os autores observaram duas bacias excepcionais entre as 17. Uma destas bacias por não produzir escoamento nas parcelas de 38% de ainc e de 56% de ap , devido ao seu solo arenoso, predominando a contribuição do 6% de aidc . A outra bacia grande e com significativa área permeável (77%) que deveria gerar escoamento, também não gerou.

As perdas iniciais variam entre 0 e 1,33mm. Apenas duas bacias apresentaram valores de 3,72 e 6mm.

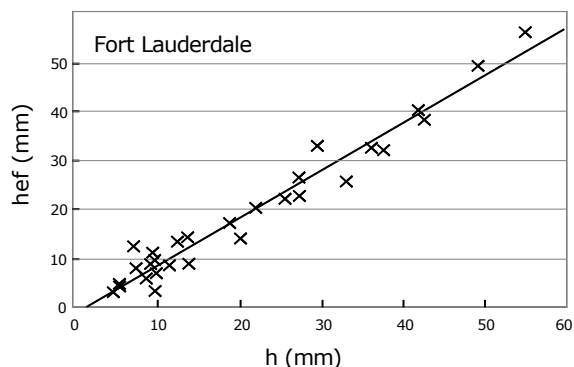


Figura 1 – Exemplo típico de predominância de escoamento de aidc - Bacia Fort Lauderdale – EUA. Adaptado de Boyd et al (1993)

Bacias com escoamentos de áreas impermeabilizadas e permeáveis

Em 9 bacias, de 26, ocorreram pontos acima da reta e o coeficiente angular B maior que a relação aidc/A , como indicado na figura 2, o que prejudicou o ajuste ao modelo linear. Estas bacias têm áreas variando de 70 a 490 ha, apenas duas com 22 e 2690 ha distante desta faixa. As alturas variaram de 1,9 até 362mm e períodos de retorno de até 50 anos.

Isto evidencia a geração de escoamento em áreas permeáveis e de impermeáveis não conectadas. Como exemplo, mostra-se na figura 2 a bacia Girilang, Austrália, com área de 35 ha, área impermeável e aidc ambas iguais a 25%, B a 0,349 e perdas hidrológicas a 3,26 mm.

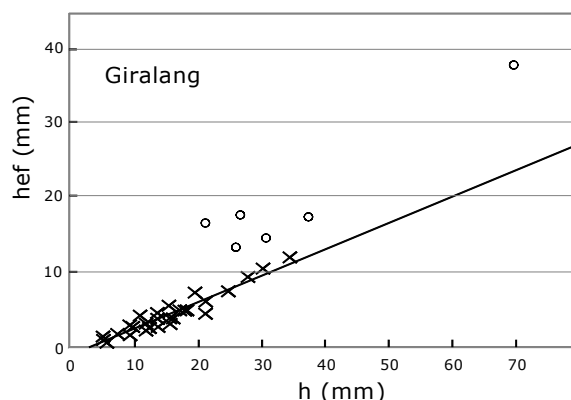


Figura 2 – Exemplo de bacia com contribuição também de áreas permeáveis (eventos indicados por círculo) - Bacia Girilang – Austrália. Adaptado de Boyd et al (1993)

Houve nestas bacias a predominância na geração de escoamento das aidc, mesmo para percentuais de aidc de 6% a 35%. Este escoamento pode ser até 25 vezes maior que o de permeáveis e, em média, 5,2 vezes superior.

Os maiores volumes escoados destas áreas ocorreram com grandes precipitações, como influência da intensidade e umidade antecedente. Para alturas de chuvas maiores de 10 até 40 a 50 mm, o escoamento de áreas permeáveis depende da forma do hietograma.

Relações entre B e as frações de aidc e ainc

Boyd et al (1993) relacionaram linearmente o conjunto de coeficientes B com as frações de $(aidc+ainc)/A$ e de $aidc/A$ para as 17 bacias com predominância de escoamento de áreas impermeabilizadas, impondo reta pela origem.

$$B = 0,74.(aidc+ainc)/A \quad R=0,83 \quad (15)$$

$$B = 0,85.aidc/A \quad R=0,82 \quad (16)$$

Os autores refizeram a regressão com mais 9 bacias, excluindo-se os eventos em ocorreu escoamento das áreas permeáveis. Obtiveram-se coeficientes angulares de 0,75 e 0,86 e coeficientes de correlação (R) também semelhantes. Uma terceira regressão incluindo mais 12 bacias, totalizando 38 bacias, não alterou significativamente os valores dos coeficientes.

A tentativa de generalizar o cálculo de B a partir da $(aidc+ainc)$ ou $(aidc)$ reduziu os valores R superiores a 0,94, calculados individualmente para cada bacia com dados de hef e h, para a faixa de 0,82 a 0,83.

Boyd et al (1994) realizaram estudo específico de bacias cuja contribuição de áreas permeáveis era significativa. Analisaram as alturas efetivas e precipitadas de 47 eventos de 3 bacias em Camberra, Austrália, sendo que, em média, houve 20 escoamentos originados de áreas impermeabilizadas e 27 escoamentos de áreas permeáveis, definidos com o mesmo critério já descritos. Estudaram os efeitos da umidade antecedente da bacia expressa pela chuva antecedente de 1 dia e de 5 dias, índice de precipitação antecedente de 5 dias e número de dias antecedentes sem chuva, e também da duração e intensidade das chuvas. Novamente a fração de aidc foi encontrada próxima às áreas impermeabilizadas mapeadas. Os pequenos escoamentos de áreas permeáveis (de 2 a 5 mm) estão relacionados a chuvas antecedentes de 1 dia, sejam elas pequenas ou gran-

des. Grandes escoamentos de áreas permeáveis ocorrem quando a altura precipitada excede 40mm e estão relacionados com precipitações antecedentes de 5 dias.

Para chuvas com alturas precipitadas menores que 40 mm, ocorreram pequenos escoamentos de áreas permeáveis sendo importantes a altura precipitada e a precipitação antecedente de um dia para as três bacias, indicando um solo com baixa capacidade de armazenamento superficial de água e com depleção rápida.

Ciaponi et al (1996) investigaram 449 eventos em 16 bacias, com áreas de 9,9 a 40,7 ha e duas outras com 155,84 e 253,5 ha, área impermeabilizada entre 0,33 a 0,91 e alturas precipitadas também bastante variadas. Os autores verificaram altos ajustes ao modelo linear, indicados por coeficientes de determinação superiores a 0,9, exceto para uma bacia, portanto estatisticamente muito significativo.

Os autores consideram que devido à estas constatações, seja por bacia ou por evento examinado, não existe contribuição significativa e sistemática de áreas permeáveis ou de áreas impermeabilizadas não conectadas, nem mesmo para alturas precipitadas elevadas. Isto se verifica nas bacias consideradas, exceto duas, possivelmente indicando que outras áreas além da aidc estejam contribuindo à rede.

Os desvios em relação ao comportamento médio da bacia foram atribuídos, pelos autores, aos fatores físicos e aleatórios.

Os fatores físicos devidos à contribuições de áreas permeáveis e impermeabilizadas não conectadas, não vieram a ser sistemáticos nem significativos. Estes fatores podem ser:

- Algumas áreas impermeabilizadas podem ser semipermeáveis e serem afetadas pela forma do hietograma.
- Para intensidade particularmente elevada algumas áreas impermeabilizadas podem descarregar em áreas permeáveis vizinhas.
- O tráfego de veículo pode conduzir a água às áreas permeáveis no centro da via.
- A evaporação pode não ser de todo negligenciável, principalmente no caso de chuvas fracas, pois no verão as temperaturas dos telhados e pavimentos são muito elevadas.
- A interceptação, na estação de verão, pode subtrair volumes hídricos não negligenciáveis em áreas urbanas com importante presença de árvores ao longo das ruas ou sobre áreas impermeabilizadas.

Os fatores aleatórios aventados foram:

- Erro na medida pontual da precipitação.
- Dificuldade de medir devido a distribuição espacial da chuva e também da exata definição dos limites da bacia.
- Erro na medida das descargas na rede de drenagem por calibração instrumental não exata e limitação de precisão, presença de depósitos, as quais interferem na transformação de nível em vazão.
- Erro de estimativa de vazões de origem não pluvial.

Estes erros são do tipo acidental, e, segundo Calomino (1987), apud Ciaponi et al (1996), podem ser superiores a 20% no caso de chuva fraca. Braga e Fernandes (2007) avaliaram pluviôgrafo tipo basculante em condições de campo e encontraram erros em torno de 20%.

Estas considerações de variabilidade de ϕ , principalmente devido aos fatores aleatórios por Ciaponi et al (1996), são razoáveis, porém limitados aos eventos e bacias por eles analisados. Boyd et al (1993, 1994) demonstraram, como exposto, que para chuvas com alturas superiores a 40 mm, dependendo das condições de umidade antecedente da bacia, áreas permeáveis podem produzir contribuições, as quais justificam pontos com valores de hef superiores a reta de regressão obtida.

Não há detalhes de estimativa de áreas impermeabilizadas, sejam elas conectadas ou não, nos trabalhos revisados. Alguns citam medidas em plantas, o que pode introduzir erros no processo. As aids, pela sua importância, têm sido modeladas separadamente das demais em modelos distribuídos, conforme Barbassa et al (2005).

CONDIÇÕES DOS LOTES URBANOS E DO MONITORAMENTO REALIZADO

O experimento foi conduzido na Riviera de São Lourenço, junto à cidade litorânea de Bertioga, estado de São Paulo. Para isto três lotes de mesmas dimensões e área de 360 m² foram monitorados entre 9/2004 e 6/2006. Um deles foi deixado em condições naturais, por isso denominado de “lote natural”, com vegetação rasteira e nativa, conforme mostrado na figura 3. Outro foi impermeabilizado em 75%, como ilustra a figura 4 e de acordo com a legislação de Bertioga - SP, sendo denominado lote

convencional. O terceiro lote foi instalado com outro propósito, por isto, não tratado neste artigo.

As superfícies dos lotes foram aterradas até 0,60 m acima da cota da sarjeta, com declividade de 1%. Usou-se areia predominantemente fina para aterro, como a do solo local. Para evitar o escoamento de águas sub-superficiais ou superficiais, as áreas vizinhas foram isoladas ao longo do perímetro de cada lote experimental, com manta de lençol plástica convenientemente estruturada em painéis de madeira.

O monitoramento da precipitação consistiu de um pluviôgrafo instalado em um dos lotes. O escoamento de cada um dos lotes foi coletado e conduzido ao vertedor triangular de parede fina para medida contínua de vazões. Os vertedores triangulares foram localizados em frente aos lotes sendo a vazão, após medida, lançadas na sarjeta. Os valores medidos de precipitação e vazão foram armazenados e coletados eletronicamente.



Figura 3 – Lote natural - Riviera São Lourenço Bertioga – SP.

Os parâmetros usados foram os seguintes:

- hef - precipitação ou altura efetiva em mm;
- ϕ_{obs} - coeficiente de precipitação efetiva, que é a relação entre a altura efetiva e a altura precipitada medidas;
- Tempo de retardamento, computado em minutos, como a diferença entre o tempo de pico de vazão obtido do hidrograma e o tempo de pico da precipitação.

O tempo de retardamento, segundo Viessman et al (1989), é caracterizado pela relação entre a extensão e a velocidade média do escoamento. Este parâmetro é influenciado pela forma da área de drenagem, declividade do canal principal, geometria e tipo de chuva. Ele é definido



Figura 4 – Lote convencional (75% impermeabilizado) na Riviera São Lourenço – Bertioga – SP.

como a diferença, em unidades de tempo, entre o centro de massa da precipitação efetiva e o centro de massa do hidrograma. Citam também como definição a diferença entre o centro de massa da precipitação efetiva e o pico de vazão e ainda o intervalo entre o pico de precipitação e o pico de vazão. Esta última definição foi usada neste trabalho.

COMPORTAMENTOS DE LOTES CONVENCIONAL E NATURAL

Apresenta-se na figura 5, a título de exemplo, o evento do dia 21/06/2005, com a precipitação em mm/h representada por diagrama de barras no eixo secundário das ordenadas. Ainda nesta figura as vazões diretamente escoadas, em L/s, estão representadas por gráficos de linha no eixo principal das ordenadas. Observa-se no hidrograma produzido pelo lote convencional, representado por linha contínua, que a cada pico de chuva há um pico de vazão, sendo eles maiores, em maior número e ocorrem mais rapidamente que no lote natural. Significa que as vazões do lote convencional foram “prontamente” lançadas na sarjeta.

O hidrograma do lote natural, representado por linha pontilhada também na figura 5, caracteriza-se por grande atenuação de vazões, poucos picos, tempos de ascensão de vazão e depleção do escoamento superficial muito maiores que do lote convencional.

Os tempos de retardamento para o lote convencional foram 3,5 minutos em média, com mínimo de 2 min e máximo de 5 min. O cômputo do tempo decorrido entre o pico de precipitação e o pico de vazão pode ser afetado pela discretização e pela complexidade da precipitação, sendo estas, portanto, estimativas do parâmetro. Para o lote natural não foi possível estimar este parâmetro, pois seus picos de vazões são bem mais suaves.

Os escoamentos superficiais indicados pela precipitação efetiva (hef) e as alturas precipitadas (h) para 15 “eventos” são apresentadas na tabela 1. É notável o efeito da precipitação antecedente nos eventos consecutivos dos dias 20 e 21/6/2005 e também da elevada altura precipitada do dia 13/9/2005 no evento do dia 16/9/2005.

A relação entre as precipitações efetivas (hef) e as alturas precipitadas (h) podem melhor ser visualizadas e relacionadas nas figuras 6 e 7, respectivamente para os lotes convencional e natural. Na figura 6 verifica-se que no lote convencional a precipitação efetiva varia linearmente com a altura precipitada, apresentando coeficiente angular B , ou ϕ_{calc} de 0,75.

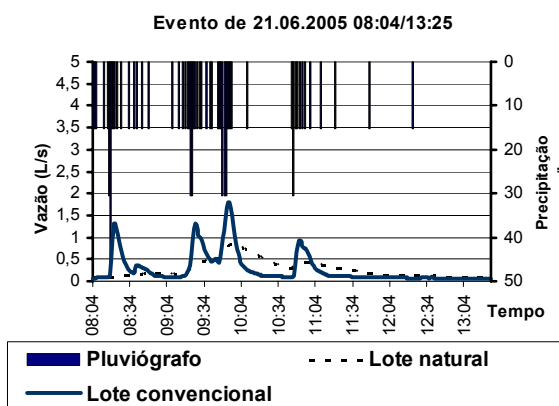


Figura 5 – Hidrogramas e hietograma dos lotes convencional e natural, Riviera de São Lourenço – Bertioga - SP.

Como a fração de área impermeabilizada do lote convencional é 0,75, significa que B ou ϕ_{calc} é igual à A_i/A , ou seja, que a área impermeabilizada funciona como diretamente conectada. Este valor é superior ao encontrado nas bacias analisadas por Boyd et al (1993), que foi igual a 0,87, conforme equação 18, porém muito próximo ao lote monitorado por Jacobsen e Harremoës (1981) que foi 0,982. Caso a regressão linear entre hef e h fosse realizada com a reta passando pela origem, B resultaria em 0,72. A dispersão em torno da reta, figura 6, possivelmente pode ser atribuída a incertezas nas medidas. Um fator físico que também pode afetar são os corredores laterais do lote convencional, formado de areia fina, embora estreito, têm algum potencial de infiltração. O evento que mais se afasta da reta superiormente foi de 37,3 mm, e os eventos

mais abaixo da reta, foram de pequena altura e sem chuvas antecedentes.

Tabela 1 – Alturas precipitadas e efetivas medidas em lotes convencional e natural para 15 eventos medidos, Riviera de São Lourenço – Bertioga – SP.

Início do evento	Altura chuva h(mm)	Altura efetiva(mm)	
		Lote Natural	Lote convencional
12/9/2004 05:35:00	37,3	5,3	31,9
09/12/2004 17:10:03	6,6	1,1	5,6
11/12/2004 2:02:13	4,1	0,5	3,8
04/3/2005 08:07:32	33,0	2,1	23,9
15/3/2005 22:05:00	24,6	3,5	16,4
23/3/2005 18:59:56	15,5	1,7	11,5
24/3/2005 08:45:52	10,4	3,1	9,9
20/6/2005 21:16:00	21,1	0,2	6,2
21/6/2005 15:01:00	13,0	3,2	4,6
21/6/2005 13:26:00	4,1	1,7	3,0
21/6/2005 08:04:00	16,8	14,2	14,9
13/9/2005 11:21:00	48,5	36,2	35,3
16/9/2005 18:44:18	18,5	11,3	12,5
03/1/2006 22:37:00	14,0	0,4	5,3
31/1/2006 13:34:32	7,4	0,3	6,4

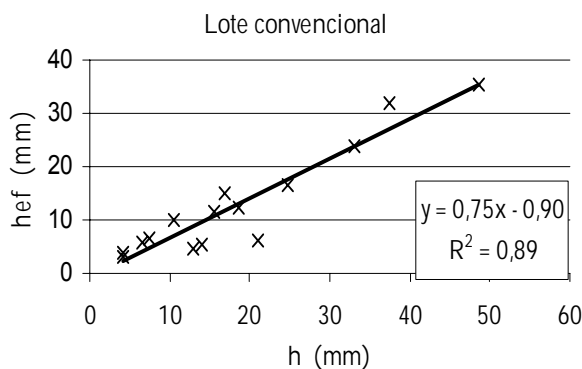


Figura 6 – Alturas precipitada e efetiva para o lote experimental convencional na Riviera de São Lourenço Bertioga – SP.

As perdas hidrológicas médias (S_i) calculadas para o lote convencional, a partir da equação 8, com valores de B (0,75) e intercepto (0,90), con-

forme figura 6, resulta igual a 1,2 mm. Valor este compatível com a literatura.

O lote natural, como ilustra a figura 7, não apresentou linearidade nas respostas, pois há grande dispersão de pontos. Provavelmente por ter maior capacidade de infiltração e, em razão disso, também estar mais sujeito às condições antecedentes de umidade no solo. O modelo linear portanto, não foi significativo para esta condições.

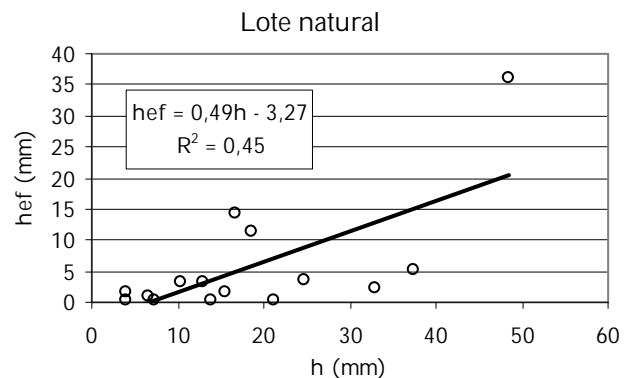


Figura 7 – Alturas precipitada e efetiva para o lote experimental natural na Riviera de São Lourenço Bertioga – SP.

CONCLUSÕES

Analisaram-se a relação entre a precipitação efetiva e a precipitação total em 15 eventos, registrados in loco, em lotes urbanos com 360 m². Um lote de uso residencial e ocupação de 75% e outro natural, sem impermeabilizações.

A relação entre as alturas escoadas e precipitadas para o lote convencional ajustou-se muito bem a uma reta, com coeficiente de determinação R^2 de 0,89. A inclinação da reta, B ou também o coeficiente de precipitação efetiva do lote, foi calculado em 0,75 e correspondente à área impermeabilizada. Verificou-se então que o lote funciona com sua área impermeabilizada "diretamente conectada", sendo possível determiná-la a partir dos dados hidrológicos medidos. Ainda para o lote convencional as perdas hidrológicas calculadas a partir do intercepto resultaram em 1,2 mm. O espalhamento observado em torno da reta deveu-se, provavelmente, a fatores aleatórios e a fatores físicos (corredores de areia fina), pois as alturas de chuva registradas foram

moderadas e a áreas permeáveis proporcionalmente pequenas.

A mesma relação para o lote natural apresenta uma dispersão grande, não sendo representativo relacionar h_{ef} com h por modelo linear. Esta tendência também foi observada na literatura.

Os experimentos e modelagens realizados deixam bastante claro a importância das áreas impermeabilizadas e respaldam seu uso na adoção de parâmetro de modelos de previsão de enchentes. Ressalta-se a necessidade de pesquisar o comportamento de bacias brasileiras, pois as condições estrangeiras são tomadas como referências, sem um estudo mais aprofundado que possa considerar as diferenças climatológicas e fisiográficas que afetam os resultados.

REFERÊNCIAS

- BARBASSA, A. P. ; PUGLIESE, P. B. ; MOREIRA, J. (2005). *Estudo de enchentes urbanas associando rede de monitoramento densa, SIG e modelo distribuído*. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa - PB. – 20 a 24 nov 2005, v. CD-ROM. p. 1-19.
- BOYD, M. J., BUFILL, M.C., KNEE, R.M. (1993). *Pervious and impervious runoff in urban catchments*. Hydrological Sciences Journal, 39 (4), 321-332.
- BOYD, M. J., BUFILL, M.C., KNEE, R.M. (1994). *Predicting pervious and impervious storm runoff from urban drainage basins*. Hydrological Sciences Journal, 39(4), 321-332.
- BRAGA, S.M., FERNANDES, C.V.S. (2007). *Performance de Sensores de Precipitação do Tipo "Tipping Bucket" (Báscula) – Um Alerta para a Ocorrência de Erros*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, - RS, v. 12, n. 1, p. 197-204, jan/mar 2007.
- BUTLER, D., DAVIES, J. (2004). *Urban Drainage*. Spon Press, Londres, 2a. ed., 543 p.
- CAMPANA, N.A., TUCCI, C.E.M.(1994) – *Estimativa de área impermeável de macro bacias urbanas*. RBE, Caderno de Recursos Hídricos, vol.12 no. 2, p 79-94.
- CIAPONI C., PAPIRI, S. (1989). *Um método per la stima di coefficiente di afflusso nei bacini di drenaggio urbani*. Università di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale. Pubblicazione n. 170, dicembre 1989.
- CIAPONI, C., NEGRI A., PAPIRI, S. (1996). *Sui coefficienti di afflusso ricavati dalle misure effettuate nei bacini urbani sperimentali*. In Atti dei Seminari "Modelli quali-quantitativi del drenaggio urbano" di San Cassiano (28-31 março 1995) e Sorrento (11-14 junho 1996), Italia.
- DESBORDES, M. (1975) . *Estimation des coefficients de ruissellement urbain*. La Tribune du Cébédéau. N. 376, pp. 106-110, março 1975.
- FANTOLI, G. *Le acque di piena nella rete delle fognature di Milano: Relazione della Commissione Cipolletti, Fantoli, Soldati*. Milano, 1904.
- FONTES, A.R.M., BARBASSA, A.P. (2003) *Diagnóstico e Prognóstico da ocupação impermeabilização Urbanas*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre-RS, v. 8, n. 2, p. 137-147, abr/jun, 2003.
- GAROTTI, L. M., IMOTO, T. S., BARBASSA, A. P. (2007). *Uso da área impermeabilidade diretamente conectada como coeficiente de escoamento superficial e comparação com outras estimativas*. In: Anais do VII Encontro Nacional de Águas Urbanas. São Carlos. v.1. CD-ROM.
- JACOBSEN, P. HARREMOES, P. (1981). *Significance of semi pervious surfaces in urban hydrology*. In. Proc. 2nd Int. Conf. Urban Storm Drainage. Water Resources Publications, Colorado, USA, 424-433.
- KIDD, C.H.R. (1978). *Rainfall-runoff processes over urban surfaces*. Proceedings International Workshop held at the Institute of Hydrology, Wallingford, England.
- LARCAN, E., MIGNOSA, P., PAOLETTI, A. (1987). *Un metodo di previsione del coefficiente di afflusso in bacini urbani*. Seminario Nazionale "La ricerca nei deflussi urbani: Camigliatello Silano (Cosenza - itália). Ottobre, 1987.
- LEE, J. G.; HEANEY, J. P. (2003). *Estimation of urban imperviousness and its impacts on stormwater systems*. Journal of Water Resources Planning and Management 39(4), pp. 321-332.
- LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A., PAULHUS, J.L.H. (1949). **Applied Hydrology**. New York, MacGraw-Hill, 1949.
- SHAAKE, J.C., GEYER, J.C., KNAPP, J.W.(1967). *Experimental examination of the rational method*. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, vol. 93, no. 6, p. 353-370, novembro 1967.
- THOLIN, A.L., KEIFER, C.J. (1960). *The hydrology of urban runoff*. Transactions ASCE, v. 125, 1308-1379.
- VISSMAN Jr, W., LEWIS, G.L., KNAPP, J.W. (1989). *Introduction to Hydrology*. 3a.edition. New York, Harper & Row Publishers, 780 p.

Hydrologic Behavior in Basins With Native and Planted Forests in the Municipality of Caçador, SC

ABSTRACT

Forestry activity has been developed in the Caçador region, Santa Catarina State, since the arrival of the first settlers. Forest and reforestation activities, mainly with the *Pinus* genera make forestry one of the leading regional economic activities. This research study aims at evaluating the outflows in basins with native and planted forests and the clear-cut effects on river flow in the managed forest. Three forested watersheds were analyzed; two of them with *Pinus taeda* L. and the other with mixed *Ombrophila* mixed. In each basin the flow was measured in a mixed spillway in which the water depth was monitored at five-minute intervals. The characteristic flows were determined and stream flow was designed for two periods, classified as before and after clear-cut. It was observed that there was more flow in basins with native forest than in managed forests and that clear-cutting may contribute to increased overflows, especially in those with a high frequency of occurrence.

Key-words: Hydrology in forests, forest management, surface streamflow.

Tabela 2 – Símbolos e siglas usadas.

ÁREA	Impermeabilizada	Ai
	Impermeabilizada diretamente conectada	aidc
	Impermeabilizada não diretamente conectada	ainc
	Permeável	ap
	Total	A
CHUVA	Altura efetiva	hef
	Altura precipitada	h
	Intensidade no tempo t	I(t)
Coeficiente angular de reta		B
Coeficiente de deflúvio		ϕ
Coeficiente de determinação		R ²
Coeficiente de correlação		R
Coeficiente de escoamento superficial		C
Coeficiente de escoamento superficial de ap		Cap
Declividade		I
Intercepto de reta		Intercepto
Retenção nas irregularidades em lâmina		S
Taxa de infiltração no tempo t		f(t)
Tempo		t
Vazão no tempo t		Q(t)
VOLUME	Escoado de uma para outra área	Vesc
	Precipitado	Vpre
	Precipitado na aidc	Vaidc
	Precipitado na ainc	Vainc
	Precipitado na ap	Vap