

INFLUÊNCIA DA IMPERMEABILIZAÇÃO E DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO
PERMANENTE NO VOLUME DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E VAZÃO DE PICO,
NA BACIA DO CÓRREGO DAS LAJES – UBERABA, MG.

Joyce Silvestre de Sousa^{1*}, José Eduardo Alamy Filho², Gilberto Coelho³

¹ * Professora/Doutoranda; Meio Ambiente/Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas; Instituto Federal do Triângulo Mineiro/Universidade Federal de Lavras; joycesilvestres@yahoo.com.br

² Professor; Engenharia Civil; Universidade Federal de Uberlândia; zeedu@feciv.ufu.br

³ Professor; Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas; Universidade Federal de Lavras; coelho@deg.ufla.br

RESUMO: O objetivo do estudo foi avaliar a influência do aumento da impermeabilização e o efetivo desempenho das APP (Áreas de Preservação Permanente) na redução do volume do escoamento superficial e vazão de pico, na bacia do Córrego das Lajes, localizada em Uberaba, Minas Gerais. Para a estimativa da chuva excedente, utilizou-se o Método da Curva Número CN do *Soil Conservation Service* (SCS). Os hidrogramas de cheia para as bacias sem reservatório de detenção foram obtidos por meio da aplicação direta do Método Santa Bárbara, e na bacia com reservatório de detenção, além do Método Santa Bárbara utilizou-se o Método de Pulz e as equações de Saint-Venant. Conclui-se que as maiores vazões de pico e os maiores volumes de escoamento superficial foram encontrados na bacia mais impermeabilizada. Apenas as APP com áreas maiores e maior percentagem em relação à área da sub-bacia correspondente mostraram-se eficientes na atenuação das vazões de pico e volumes.

Palavras-chave: macrodrenagem, atenuação de vazão, transformação chuva-vazão, simulação.

INFLUENCE OF IMPERMEABILIZATION AND PERMANENT PRESERVATION
AREAS IN THE VOLUME OF RUNOFF AND PEAK FLOW AT THE LAJES STREAM
BACIN, UBERABA - MG

ABSTRACT: The aim of the study was to evaluate the influence of increased waterproofing and effective performance of APP (Permanent Preservation Areas) in reducing the volume of runoff and peak flow in the basin of Stream Lajes, located in Uberaba, Minas Gerais. To estimate the excess rain, we used the Method Curve Number CN the Soil Conservation Service (SCS). The flood hydrograph for the basins without detention reservoir were obtained through direct application of Method Santa Barbara, and the basin with detention reservoir, in

addition to Method Santa Barbara, it was used the Pulz method and the equations of Saint-Venant. It was concluded that the major peak flow and larger volumes of runoff were found at the sealed basin. Only APP with larger areas and higher percentage in relation to the area of the corresponding sub-basin were effective in attenuating peak flows and volumes.

Key-words: macro drainage, flow attenuation, rainfall-runoff transformation, simulation.

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização diminui a cobertura vegetal e aumenta a impermeabilização do solo, direcionando maior parcela de água pluvial a um escoamento superficial direto, dada a redução da infiltração. Como consequência desses dois fatores ocorre um aumento nos volumes escoados e nas vazões de pico, ao mesmo tempo em que ocorre a redução do tempo de concentração da água da chuva, provocando eventos de cheias cada vez mais críticos (Navarro, 2013).

Segundo Rodrigues (2011) estudos dos processos hidrológicos demonstram que a cobertura vegetal retém a maior parte da água precipitada por promover maior infiltração da água no solo, drenagem vertical e percolação, diminuindo o escoamento superficial da água das chuvas e proporcionando ascensão do nível de água da zona não saturada e nível freático.

Neste contexto, a manutenção da integridade das Áreas de Preservação Permanente (APP) no meio urbano, legisladas pelo Código Florestal (Brasil, 2012); pode contribuir para a proteção ambiental, minimizando os efeitos da urbanização, no que se refere à drenagem urbana (interceptando parte da água precipitada, facilitando a infiltração das águas das chuvas no subsolo e reduzindo o escoamento superficial), no controle da erosão; na qualidade de vida das pessoas, contribuindo para a diminuição da poluição atmosférica, sonora e para a melhoria do clima. Para a quantificação efetiva destes benefícios relacionados à macrodrenagem urbana, faz se necessária à simulação desses fenômenos (Tucci, 1997; Sousa, 2008).

A simulação é o processo de utilização de um modelo, entendido como a representação de um fenômeno na linguagem matemática, construído após sua observação na

natureza, abstração e interpretação das variáveis físicas relevantes na sua descrição (Sousa, 2008; Tucci, 2005). A vantagem da utilização de modelos é que, via simulação, podem-se diagnosticar determinadas situações, ou prever diferentes cenários (Sousa, 2008; Da Paz et al, 2010) .

Na aplicação de modelos hidrológicos, a precipitação atua como um dos agentes mais relevantes. É a partir da quantificação da chuva e das características da área analisada, como tipo de solo e nível de impermeabilização, que ocorre a denominada transformação chuva-vazão. Em outras palavras, isto significa calcular a quantidade de chuva que será transformada em escoamento superficial, agente primordial das enchentes urbanas.

De acordo com Zuffo e Leme (2005) a falta de medições de vazões em rios urbanos, fato que permitiria a adoção de métodos probabilísticos ou a calibração dos parâmetros dos métodos determinísticos, mais realistas para nossas bacias urbanas, dificulta uma melhor previsão das vazões de projeto, uma vez que não se conhece a frequência e a magnitude dessas vazões. O considerável desenvolvimento da hidrologia, nessas últimas décadas, colocou à disposição dos projetistas uma série de métodos para a estimativa das descargas máximas em bacias hidrográficas. Ainda segundo os autores, os métodos baseados nos hidrogramas unitários sintéticos são muito utilizados em locais com falta de dados de vazões, como é o caso das bacias urbanas, porém utilizando-se das informações pluviométricas que são geralmente mais disponíveis. Um exemplo desses métodos é o método determinístico do Hidrograma Urbano de Santa Bárbara (HUSB). Uma vantagem do método HUSB é que suas equações básicas são simples, havendo a necessidade de se calcular a precipitação excedente (escoamento superficial) para cada intervalo de tempo. Uma outra vantagem apresentada pelo método HUSB é não ter a tendência de superestimar o pico do hidrograma de escoamento, como é o caso do método triangular do Soil Conservation Service (SCS), que apresenta valores da ordem de 20% superiores aos estimados pelo HUSB (Zuffo e Leme, 2005).

O córrego das Lajes drena a maior parte da chuva excedente, visto que sua bacia apresenta os mais elevados níveis de impermeabilização da cidade. Nota-se que a qualidade de vida de grande parte da população da cidade está relacionada ao comportamento da bacia

em dias de chuvas intensas. Apesar do elevado grau de impermeabilização, existem áreas não urbanizadas na vizinhança do córrego das Lajes, as quais, de acordo com o Código Florestal (Brasil, 2012); devem ser consideradas como de preservação permanente. Todavia, nessas regiões, ainda há extensões consideráveis de áreas verdes que sobrepujam os limites especificados pela legislação.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência do aumento da impermeabilização e verificar o efetivo desempenho das APP na redução do volume do escoamento superficial e vazão de pico, na bacia urbana do Córrego das Lajes, localizada em Uberaba, Minas Gerais.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo se localiza no município de Uberaba, região do Triângulo Mineiro do Estado de Minas Gerais. O clima de Uberaba, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, tropical quente úmido, com inverno frio (15/16 °C) e seco. As médias anuais de precipitação e temperatura são respectivamente de 1.474 mm e 22,6 °C (Fernandes et al, 2011).

A bacia do Córrego das Lajes (Figura 1), afluente do Rio Uberaba; foi escolhida para este estudo em função da localização e proporção desta na cidade de Uberaba; abrangendo 60% da área urbana, além de apresentar um agravante natural: o formato aproximadamente circular (Figura 1), fator de forma Kf 0,64 e coeficiente de compacidade KC 1,45; as encostas íngremes e as áreas aproximadamente iguais das suas sub-bacias; todos os aspectos facilitadores da concentração do escoamento superficial. A bacia tem uma área de 2638 ha (26,38km²), com ponto mais alto na altitude 836,70 m, situado nas coordenadas (19°44'23,67"S, 47°53'35,58"W). O ponto mais baixo da bacia, o qual naturalmente corresponde à sua foz, situa-se na altitude 694,60 m; latitude 19°43'26,17"S e na longitude 47°57'20,12"W. A declividade máxima da bacia é de 26,5%. A bacia tem uma largura máxima de 7889,2 m e comprimento de 6255 m (MORAIS, 2001).

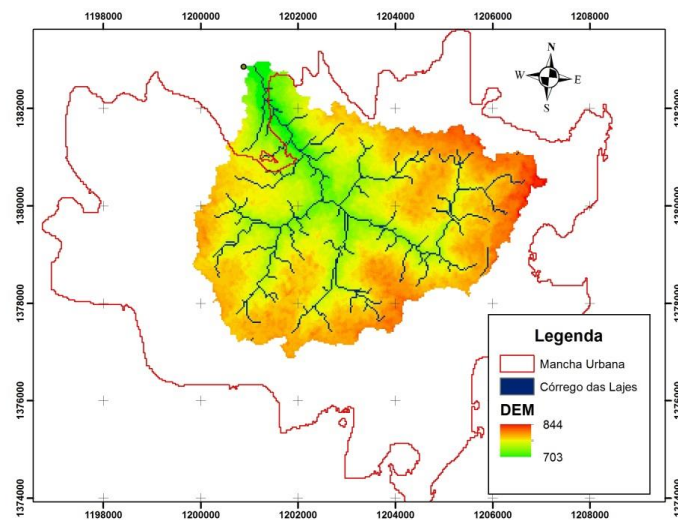


Figura 1. Localização da Bacia do Córrego das Lajes na cidade de Uberaba MG.
Figure 1. Location of Stream Lajes Basin in the city of Uberaba MG.

O mapeamento das áreas permeáveis foi realizado através de digitalização manual, no programa SPRING 4.3.3 (Câmara, 1996); do recorte do foto-mosaico da cidade de Uberaba (obtido na Prefeitura Municipal de Uberaba e composto por fotografias em escala 1:15.000). O recorte e georreferenciamento do foto-mosaico também foram realizados no programa SPRING 4.3.3.

Considerou-se como áreas permeáveis: lotes particulares ou públicos (sem construção ou qualquer tipo de impermeabilização, maiores que aproximadamente 50 m²); áreas verdes (espaços livres públicos com, no mínimo, 70% da área isenta de impermeabilização); áreas públicas (lotes estipulados pela prefeitura para se transformarem em áreas verdes); APP, conforme Brasil (2012), faixa de terra que varia de 30 a 500 metros de largura das margens de qualquer corpo de água, natural ou artificial.

Neste estudo, a bacia do córrego das Lajes foi subdividida em sub-bacias, ver Figura 2: Leopoldinos 1, 2, 3, 4, 5; Guilherme Ferreira, Fidélis Reis, Santos Dumont e Restante.

As quantificações lançaram mão de simulações hidrológicas, com a estimativa do escoamento superficial gerado (transformação chuva-vazão) e a construção de hidrogramas nos exutórios das sub-bacias Santos Dumont, Leopoldino 1 e Restante, que por conterem maiores porcentagens de áreas permeáveis da bacia total, tornaram-se o foco das simulações deste estudo. A Sub-bacia Leopoldino 1 foi subdividida em Leopoldino 1A e Leopoldino 1B, pela necessidade de se levar em conta o efeito da atenuação causada por dois reservatórios de retenção em série, localizados nessa sub-bacia.

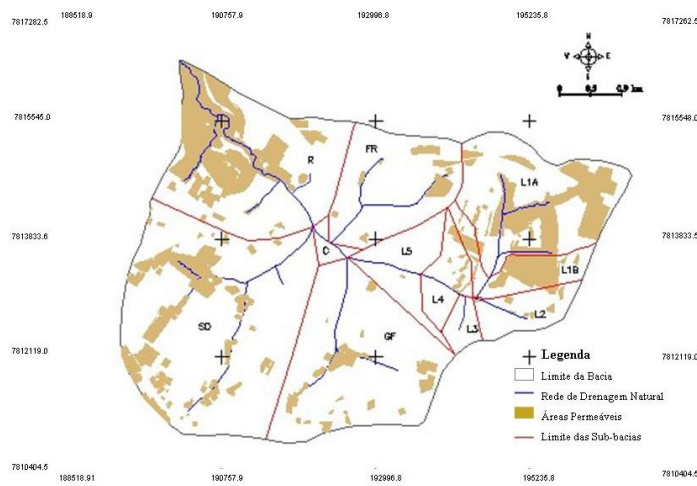


Figura 2. Distribuição das áreas permeáveis por sub-bacias, na bacia do córrego das Lajes. Sub-bacias são definidas por siglas: L1A (Sub-bacia Leopoldino 1A); L1B (Sub-bacia Leopoldino 1B); L2 (Sub-bacia Leopoldino 2); L3 (Sub-bacia Leopoldino 3); L4 (Sub-bacia Leopoldino 4); L5 (Sub-bacia Leopoldino 5); FR (Sub-bacia Fidélis Reis); R (Sub-bacia Restante); C (Sub-bacia Centro); SD (Sub-bacia Santos Dumont); GF (Sub-bacia Guilherme Ferreira).

Figure 2. Distribution of permeable areas by sub-basins, in the stream basin of Lajes. Sub-basins are defined by acronyms: L1A (Sub-basin Leopoldino 1A); L1B (Sub-basin Leopoldino 1B); L2 (Sub-basin Leopoldino 2); L3 (Sub-basin Leopoldino 3); L4 (Sub-basin Leopoldino 4); L5 (Sub-basin Leopoldino 5); FR (Sub-basin Fidelis Reis); R (Sub-basin Restante); C (Sub-basin Centro); SD (Sub-basin Santos Dumont); GF (Sub-basin Guilherme Ferreira).

A estimativa dos hidrogramas de cheia nos exutórios das sub-bacias estudadas foi realizada pelo Método Santa Bárbara (Zuffo e Leme, 2005). Dentre os dados necessários para inicializar o Método Santa Bárbara citam-se equação de chuvas de Uberaba, retirada de (Nascimento et al, 2005):

$$i_{d,T} = \frac{33,382 - 7,558 \left\{ \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}}{d^\eta}$$

Equação 1

Na Equação 1, i é a intensidade, em mm/h, da precipitação de duração d para um tempo de retorno T ; d é a duração da precipitação, em horas; T é o tempo de retorno, em anos. O parâmetro η , na Equação 1, assume os seguintes valores:

- $\eta = 0,5681$, duração da precipitação situada no intervalo $0,0833 \leq d \leq 1$ (5 min a 1 h);
- $\eta = 0,7398$, duração da precipitação situada no intervalo $1 \leq d \leq 24$ (1 h a 24 h).

Além do tempo de recorrência (25anos), duração (2h) e o tipo de distribuição temporal da tormenta, curvas de Huff (Huff, 1977), com 50% de probabilidade de ocorrência da precipitação máxima; área total e área impermeável (obtidas pelo mapeamento dessas superfícies); tempo de concentração e valor CN resultante. Para a estimativa da chuva excedente, utilizou-se do Método da Curva Número CN do *Soil Conservation Service* (SCS,1975); que baseia-se na seleção de um número CN (*curva de runoff*) que corresponde a um coeficiente de escoamento superficial, cujo valor varia em função das características das áreas permeáveis da bacia. Os números CN são obtidos a partir de tabelas que constituem a combinação empírica de pelo menos três fatores: grupo do solo, cobertura e condições de umidade antecedente do solo. É importante notar que, nas áreas urbanas, coexistem áreas impermeáveis e áreas permeáveis. Dessa forma, houve a necessidade de se estimar um número CN composto que levou em conta a fração de área impermeável. Além da obtenção do número CN, o método SCS ainda exige um parâmetro que representa o potencial máximo de retenção do terreno (S) após o início do escoamento superficial. De posse desses dois parâmetros, o escoamento superficial (Q) pôde ser calculado (Tomaz, 2002).

O valor estimado do tempo de concentração (t_c) de cada sub-bacia foi obtido considerando-se a soma dos resultados gerados pela aplicação da Fórmula Califórnia Culverts Practice (CDH, 1960; Sharifi e Hosseini, 2011) – para áreas de escoamento difuso e trechos

não canalizados do talvegue principal – com a média da equação do Método Cinemático (Tucci, 2003) e do Método SCS de 1975 (SCS, 1975) – para os trechos canalizados.

Na aplicação do Método Santa Bárbara, a duração da chuva foi discretizada, ou seja, dividida em intervalos de tempo menores (Δt) nos quais foram calculadas as vazões instantâneas, em operações de “marcha temporal”. Ao final de cada passo de tempo, eram estimadas as vazões de saída que forneciam o hidrograma em cada exutório. Esse procedimento sugeriu a construção de um algoritmo para solução das suas operações, evoluindo para a construção de um programa na linguagem computacional *Visual Basic for Applications* (VBA). Para o cálculo do hidrograma na sub-bacia Leopoldino 1, devido à presença dos reservatórios de retenção, além do Método Santa Bárbara, foram utilizados o Método de Pulz – para o cálculo do amortecimento nos reservatórios de detenção (Moruzzi et al, 2009) – e as equações de Saint-Venant (Strelkoff, 1970; Morris, 1979; Da Luz, 1983) – para realizar a propagação das vazões no canal que liga o último reservatório de detenção até o exutório da sub-bacia. O esquema explícito de diferenças finitas de Mc Cormack foi então utilizado para a solução numérica das equações de Saint-Venant (Tomaz, 2002).

Os diferentes cenários de impermeabilização utilizados nas simulações das sub-bacias foram:

Cenário Atual: representa as vazões e volumes gerados no atual uso do solo;

Cenário 1: representa as vazões e volumes gerados em uso futuro do solo, onde todas as áreas verdes, áreas públicas e lotes vagos seriam impermeabilizados, restando somente as APP como áreas permeáveis. Esse cenário pode ser considerado como de máxima impermeabilização, já que a impermeabilização total das APP é ilegal;

Cenário 2: representa as vazões e volumes gerados em uso futuro do solo, onde todas as áreas verdes, áreas públicas, APP e lotes vagos seriam impermeabilizados. Esse cenário, embora extremo, com 100% de impermeabilização e foi simulado para avaliar a real influência das APP no amortecimento das cheias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Sukopp e Werner (1991) apud Buccheri Filho e Nucci (2006) a cidade ideal, que apresentaria as condições ideais para a conservação da natureza e da paisagem, deveria ter 33% da área central permeável e não edificada, o que não foi observado na bacia do córrego das Lajes. A bacia possui 21,98 km² de área impermeabilizada, o que corresponde a 83,3% dos seus 26,38 km² e estabelece um percentual de apenas 16,7% de áreas permeáveis. O mapa da distribuição das áreas permeáveis na bacia do córrego das Lajes é ilustrado na Figura 3. A Tabela 1 lista a porcentagem de área impermeável de cada cenário simulado.

Analisando a Figura 3 e a Tabela 1, verifica-se que as áreas periféricas da bacia possuem mais áreas permeáveis do que as regiões centrais, onde os bairros são mais antigos e cuja urbanização está mais consolidada, constituindo-se na sua maioria de zonas comerciais.

Tabela 1. Porcentagem de área impermeável de cada cenário, calculado pelo mapeamento do uso do solo.
Table 1. Percentage of waterproof area of each scenario, calculated by mapping the land use.

Cenário	Sub-Bacias										
	C	L3	L5	L2	G.F	F.R	L4	S.D	R	L1A	L1B
Atual	100	100	99,9	95,4	94,5	94,3	93,8	86,2	69,8	69,3	57,6
1	-	-	-	-	99,6	97,5	-	99,0	90,4	89,3	100

Legenda: L1A (Sub-bacia Leopoldino 1A); L1B (Sub-bacia Leopoldino 1B); L2 (Sub-bacia Leopoldino 2); L3 (Sub-bacia Leopoldino 3); L4 (Sub-bacia Leopoldino 4); L5 (Sub-bacia Leopoldino 5); FR (Sub-bacia Fidélis Reis); R (Sub-bacia Restante); C (Sub-bacia Centro); SD (Sub-bacia Santos Dumont); GF (Sub-bacia Guilherme Ferreira).

As discussões deste estudo restringem-se as situações das sub-bacias Leopoldino 1 (composta pelas bacias Leopoldino 1A e Leopoldino 1B, conforme Figura), Restante e Santos Dumont, pois estas possuem diferenças consideráveis de impermeabilização em

relação aos cenários (impermeabilização menor que 87% no cenário atual), o que causou diferença nos hidrogramas gerados.

A Tabela 2 apresenta os valores de CN composto das sub-bacias, nos diversos cenários simulados.

Tabela 2. Valores de CN composto das sub-bacias, nos diversos cenários simulados.
Table 2. Values of CN composed of sub -basins in the various simulated scenarios.

Sub-bacias/ Cenário	CN-Solo Normal			CN-Solo Saturado		
	Atual	1	2	Atual	1	2
Santos Dumont	81,7	84,8	92	94,7	96,8	98
Restante	77,8	82,7	92	91,9	95,4	98
Leopoldino 1A	77,6	82,4	92	91,8	95,2	98
Leopoldino 1B	74,8	92	92	89,8	98	98

As Figuras 3, 4 e 6, apresentam respectivamente os hidrogramas gerados para a bacia Santos Dumont, Restante e Leopoldino 1; para diferentes cenários de impermeabilização e diferentes distribuições temporais de chuva, sendo as letras: A- Chuva com probabilidade de 50% no primeiro quartil , B- Chuva com probabilidade de 50% no segundo quartil, C- Chuva com probabilidade de 50% no terceiro quartil, D- Chuva com probabilidade de 50% no quarto quartil. Os resultados ilustrados referem-se à condição de solo normal em termos de umidade antecedente.

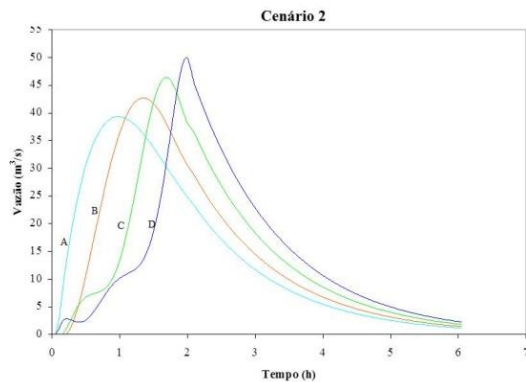
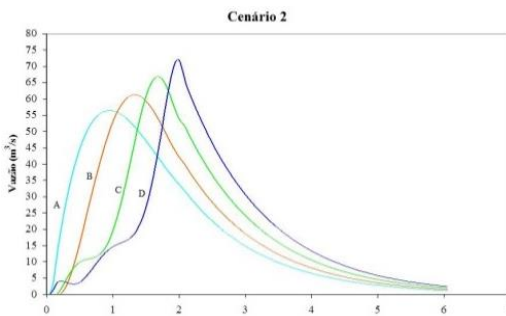
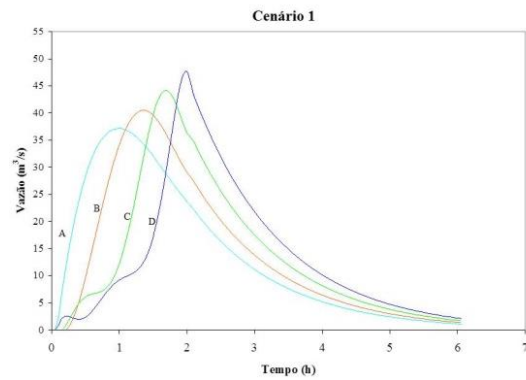
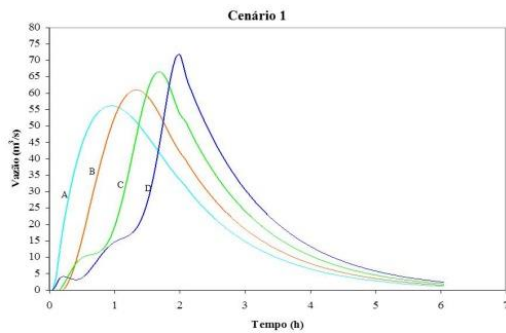
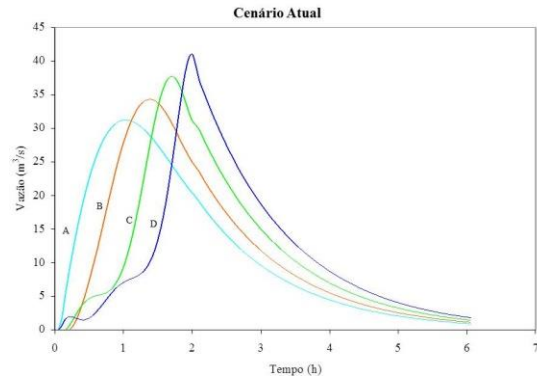
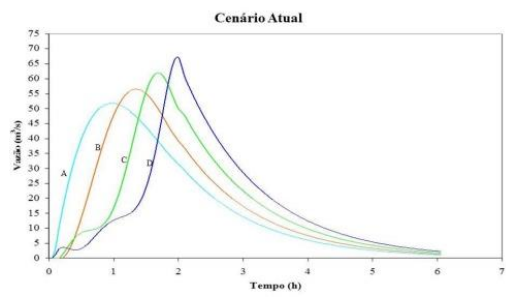


Figura 3. Hidrogramas gerados para a sub-bacia Santos Dumont.

Figura 4. Hidrogramas gerados para a sub-bacia Restante.

Figure 3. Hydrograph generated for sub-basin Santos Dumont.

Figure 3. Hydrograph generated for sub-basin Restante.

O hidrograma final (total ou resultante) foi obtido pela superposição do hidrograma da sub-bacia Leopoldino 1B e da propagação das vazões no canal de 300 m, que liga a saída do último reservatório até o exutório da bacia, Figura 5.

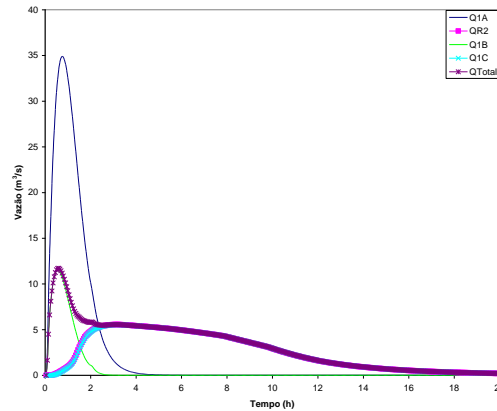


Figura 5. Hidrogramas gerados para a sub-bacia Leopoldino 1.
Figure 5. Hydrograph generated for sub-basin Leopoldino 1.

Os resultados ilustrados na Figura 5 referem-se à condição de solo normal em termos de umidade antecedente, uso atual do solo (cenário atual) e chuva com probabilidade de 50% no primeiro quartil. Onde: Q1A - Vazão de entrada do 1º reservatório (Vazão da sub-bacia Leopoldino 1A); QR2 - Vazão de saída dos reservatórios de retenção; Q1C - Vazão propagada no canal; Q1B - Vazão da sub-bacia a jusante dos reservatórios (Leopoldino 1B); Q Total- Vazão resultante para a área considerada.

Através da análise da Figura 5, comparando-se Q1A e QR2 verifica-se a eficiência na redução das vazões de pico proporcionada pelos reservatórios de retenção. Nesse aspecto, o papel da APP está no amortecimento das vazões de entrada nos reservatórios, haja vista que elas situam-se a montante destes.

As Figuras 6 a 8 apresentam respectivamente, as vazões de pico geradas para a sub-bacia Santos Dumont, Restante e Leopoldino 1; para período de retorno (T_r) 25anos, diferentes cenários de impermeabilização, de condições do solo e diferentes distribuições temporais de chuva (A- Chuva com probabilidade de 50% no primeiro quartil B- Chuva com probabilidade de 50% no segundo quartil C- Chuva com probabilidade de 50% no terceiro quartil D- Chuva com probabilidade de 50% no quarto quartil).

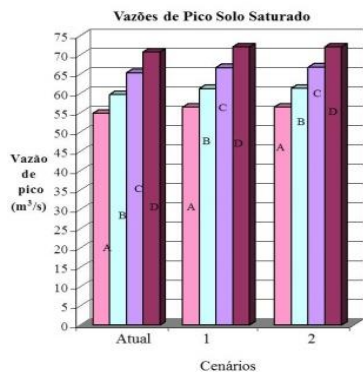
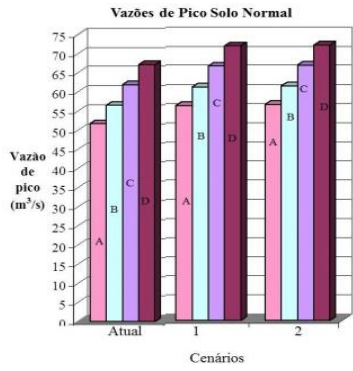


Figura 6. Vazões de pico geradas para a sub-bacia Santos Dumont.
Figure 6. Peak flow generated for sub-basin Santos Dumont.

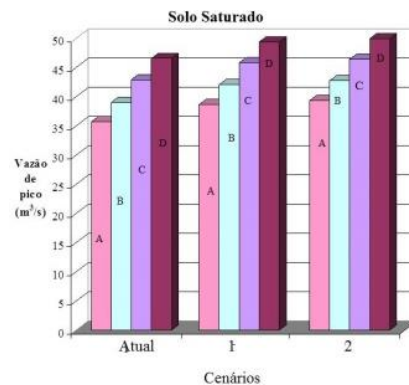
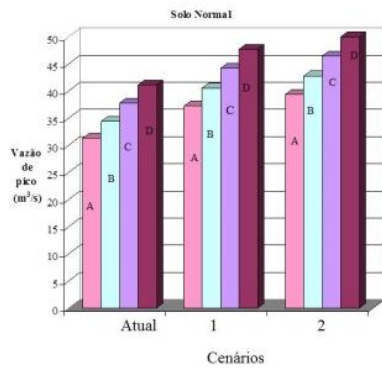


Figura 7. Vazões de pico geradas para a sub-bacia Restante.
Figure 7. Peak flow generated for sub-basin Restante.

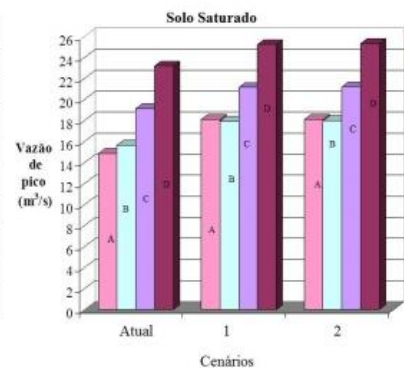
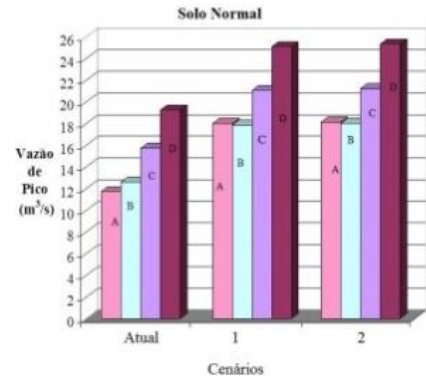


Figura 8. Vazões de pico geradas para a sub-bacia Leopoldino 1.
Figure 8. Peak flow generated for sub-basin Leopoldino 1.

As Figuras 9 a 11 apresentam respectivamente, volumes de escoamento superficial gerados para a sub-bacia Santos Dumont, Restante e Leopoldino 1; para período de retorno (Tr) 25anos, diferentes cenários de impermeabilização, de condições do solo e diferentes distribuições temporais de chuva, onde as letras significam: A- Chuva com probabilidade de 50% no primeiro quartil, B- Chuva com probabilidade de 50% no segundo quartil, C- Chuva com probabilidade de 50% no terceiro quartil, D- Chuva com probabilidade de 50% no quarto quartil.

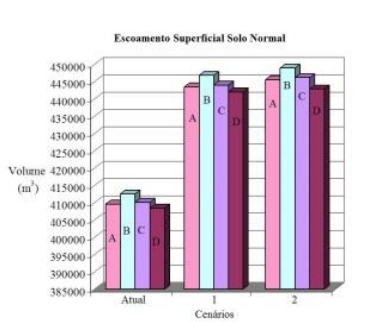


Figura 9. Volumes de escoamento superficial gerados para a sub-bacia Santos Dumont.
Figure 9. Runoff volumes generated for sub-basin Santos Dumont.

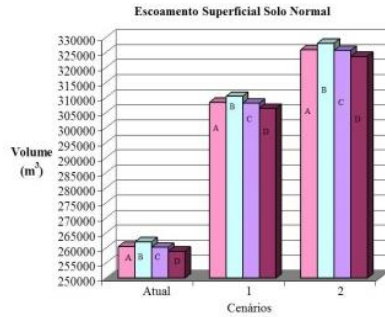


Figura 10. Volumes de escoamento superficial gerados para a sub-bacia Restante.
Figure 10. Runoff volumes generated for sub-basin Restante.

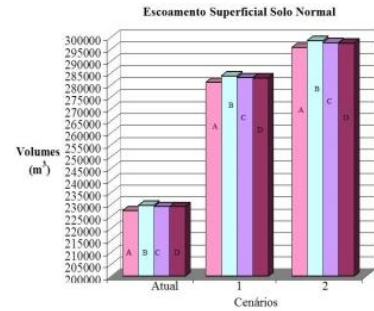
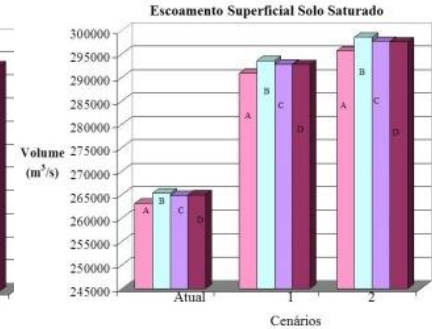
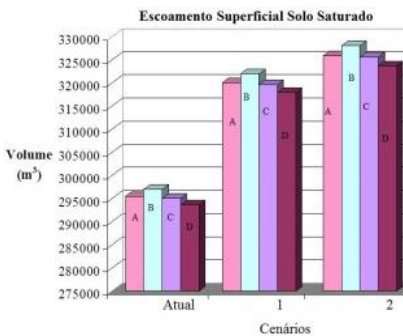
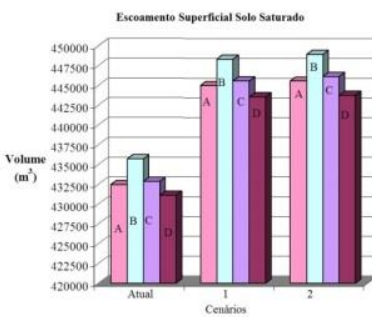


Figura 11. Volumes de escoamento superficial gerados para a sub-bacia Leopoldino 1.
Figure 11. Runoff volumes generated for sub-basin Leopoldino 1.



Para a melhor percepção dos acréscimos ocorridos nas vazões de pico e nos volumes para os diferentes cenários, foi realizada uma comparação com os resultados do cenário atual, que possui a maior quantidade de áreas permeáveis. A porcentagem correspondente desses acréscimos em relação à vazão e volumes calculados no cenário atual está apresentada nas Tabelas 3 a 5. Essa porcentagem de acréscimo foi calculada a partir da equação 2 :

$$\Delta\phi\% = \frac{100(\phi_1 - \phi_i)}{\phi_1}$$

Equação 2

Na Equação 2, ϕ representa uma variável genérica (vazão de pico ou volume de escoamento superficial), o sub-índice 1 representa os valores de ϕ no cenário atual e o sub-índice i representa os cenários 1 e 2.

Tabela 3. Acréscimos, em relação às condições atuais de uso do solo (cenário atual), nas vazões de pico e volume de escoamento na Sub-bacia Santos Dumont.

Table 3. Increases in relation to the current conditions of land use (current scenario), the peak flow and volume flow in the Sub-basin Santos Dumont.

		Cenário 1				Cenário 2			
		Vazão (m ³ /s)	(%)	Volume (m ³)	(%)	Vazão (m ³ /s)	(%)	Volume (m ³)	(%)
Solo Normal/ Quartil	1°	4,43	8,6	33862	8,3	4,70	9,1	35957	8,8
	2°	4,49	8,0	34244	8,3	4,77	8,4	36366	8,8
	3°	4,58	7,4	33931	8,3	4,86	7,8	36032	8,8
	4°	4,66	6,9	33642	8,2	4,79	7,1	34478	8,4
	Solo Saturado/ Quartil	1°	1,58	2,9	12563	2,9	1,65	3,0	13112
	2°	1,53	2,6	12668	2,9	1,60	2,7	13247	3,0
	3°	1,40	2,1	12728	2,9	1,45	2,2	13291	3,1
	4°	1,31	1,9	12492	2,9	1,34	1,9	12689	2,9

Tabela 4. Acréscimos, em relação às condições atuais de uso do solo (cenário atual), nas vazões de pico e volume de escoamento na Sub-bacia Restante.

Table 4. Increases in relation to the current conditions of land use (current scenario), the peak flow and volume flow in the Sub-basin Restante.

		Cenário 1				Cenário 2			
		Vazão (m ³ /s)	(%)	Volume (m ³)	(%)	Vazão (m ³ /s)	(%)	Volume (m ³)	(%)
Solo Normal/ Quartil	1°	5,91	18,9	47958	18,4	8,05	25,8	65432	25,1
	2°	6,17	18,0	48358	18,5	8,39	24,4	66023	25,2
	3°	6,43	17,0	47909	18,4	8,67	23,0	65388	25,1

	4°	6,62	16,1	47498	18,3	8,89	21,7	64804	25,0
Solo Saturado/ Quartil	1°	2,95	8,3	24534	8,3	3,64	10,2	30370	10,3
	2°	3,00	7,7	24972	8,4	3,69	9,4	31024	10,4
	3°	2,89	6,7	24638	8,3	3,51	8,2	30560	10,4
	4°	2,82	6,1	24313	8,3	3,40	7,3	30105	10,3

Tabela 5. Acréscimos, em relação às condições atuais de uso do solo (cenário atual), nas vazões de pico e volume de escoamento na Sub-bacia Leopoldino 1.

Table 5. Increases in relation to the current conditions of land use (current scenario), the peak flow and volume flow in the Sub-basin Leopoldino 1.

		Cenário 1				Cenário 2			
		Vazão (m ³ /s)	(%)	Volum e (m ³)	(%)	Vazão (m ³ /s)	(%)	Volume (m ³)	(%)
Solo Normal/ Quartil	1°	6,28	53,6	53657	23,6	6,41	54,8	68232	30,0
	2°	5,25	41,7	54239	23,6	5,40	42,9	68978	30,0
	3°	5,33	33,9	53993	23,6	5,51	35,0	68641	30,0
	4°	5,85	30,4	53819	23,5	6,09	31,6	68393	29,8
Solo Saturado/ Quartil	1°	3,26	21,9	27752	10,5	3,27	22,0	32534	12,4
	2°	2,29	14,6	28313	10,7	2,31	14,7	33277	12,5
	3°	2,02	10,6	28036	10,6	2,07	10,8	32907	12,4
	4°	2,05	8,8	27779	10,5	2,13	9,2	32560	12,3

As simulações evidenciaram que as maiores vazões de pico e os maiores volumes de escoamento superficial foram encontrados na sub-bacia Santos Dumont. Esse resultado é justificado pois esta é a sub-bacia mais impermeabilizada, ver Tabela 1; em comparação às 3 sub-bacias discutidas.

Na sub-bacia Leopoldino 1, para condição de solo normal, em termos de vazão de pico o aumento percentual (em relação ao cenário atual) passou de 3,7% para 53,6%. Este aumento foi considerado muito grande, maior que o da sub-bacia Restante, que possui características mais parecidas com esta, que foi de 13% para 18%. Essa discrepância é justificada porque os lotes vagos da sub-bacia Leopoldino 1 equivalem a 1,03km² dos 1,45km² de áreas permeáveis presentes na bacia, ou seja, 70,8%. Já na sub-bacia Restante dos 1,46km² de áreas permeáveis, os lotes vagos representam 0,805km², ou seja, 55,16%.

Nunes e Fiori (2008) estudando a bacia hidrográfica do rio Atuba, situada no Primeiro Planalto Paranaense, também verificaram aumento para o volume de escoamento superficial e vazão de pico conforme incremento da urbanização/impermeabilização. Para o período compreendido entre os anos de 1980 a 2000 verificaram que o acréscimo de 15% das áreas impermeáveis, também proporcionou um aumento no volume escoado, de cerca de 6%; gerando um aumento de 24% da vazão de pico.

Justino et al (2011), estudando a Bacia urbana do Córrego Lagoinha localizada em Uberlândia - MG descrevem que os resultados obtidos na simulação dos cenários mostraram que para uma variação de 29 a 54% no índice de áreas impermeáveis, a vazão de pico pode sofrer um aumento de até 59,40% sobre a vazão de pico do cenário de referência, tendência de aumento também verificada nas simulações deste estudo.

A eficiência das APP, no amortecimento das vazões de pico e na redução de volume, pode ser calculada pela comparação entre o cenário 3 (impermeabilização total) e o cenário 2 (somente a APP como área permeável); matematicamente descrito como:

$$E\% = \frac{100 (\Phi_2 - \Phi_1)}{\Phi_1} \quad \text{Equação 3}$$

Na Equação 3, os sub-índices 2 e 3 referem-se aos cenários de impermeabilização. Conforme foi definido na Equação 1, Φ é uma variável que representa a vazão de pico ou o volume de escoamento superficial.

As Tabelas 6 a 8 discriminam as eficiências das APPs na atenuação de vazões e na redução dos volumes nas Sub-bacias Santos Dumont, Restante e Leopoldino 1, respectivamente. Para isto foram consideradas quatro distribuições temporais de precipitação, todas elas baseadas nas curvas de Huff, com 50% de probabilidade de ocorrência da precipitação máxima. As simulações partiram de uma precipitação de 25 anos de tempo de recorrência e 2 h de duração.

A partir da análise dos resultados da Tabela 6, em condições normais do solo, a APP da sub-bacia Santos Dumont fornece uma eficiência em torno de, no máximo 0,5 %, seja na atenuação do pico de vazões, seja na redução de volumes, o que equivale a 0,27 m³/s e 2.122 m³, respectivamente. Esses valores são considerados baixos, pois esta APP corresponde a apenas 1% da área total da sub-bacia em questão, o que justifica a sua baixa eficiência na atenuação das vazões de pico. Destaca-se também a significativa queda na eficiência de atenuação que esta APP apresentou quando o solo está saturado.

Tabela 6. Eficiência da APP na sub-bacia Santos Dumont na atenuação de vazões e redução de volumes.
Table 6. APP efficiency in the sub-basin Santos Dumont in attenuating flows and reduced volumes.

	Eficiência na atenuação de vazões %		Eficiência na redução de volumes %	
	solo normal	solo saturado	solo normal	solo saturado
1º	0,48	0,12	0,51	0,13
2º	0,45	0,11	0,51	0,13
3º	0,41	0,08	0,51	0,13
4º	0,19	0,03	0,20	0,05

Tabela 7. Eficiência da APP na sub-bacia Restante na atenuação de vazões e redução de volumes.
Table 7. APP efficiency in the sub-basin Restante in attenuating flows and reduced volumes.

	Eficiência na atenuação de vazões %		Eficiência na redução de volumes %	
	solo normal	solo saturado	solo normal	solo saturado

1º	5,45	1,74	5,36	1,79
2º	5,19	1,61	5,38	1,84
3º	4,84	1,33	5,37	1,82
4º	4,55	1,15	5,35	1,79

Analisando a Tabela 7, observa-se que, em condições normais do solo, as APP presentes na sub-bacia Restante fornecem eficiência de 5,5% na atenuação das vazões de pico, o que equivale a 2,14 m³/s. Com relação à redução dos volumes, esta chega a até 5,4%; o que equivale a 17.665 m³. Pode-se dizer que as APP dessa sub-bacia são mais eficientes na atenuação de vazões e na redução dos volumes, já que atenuam 2,27 m³/s, para chuva com probabilidade de 50% no quarto quartil. Isto é justificado pelo fato das APP corresponderem a 9,6% da área total da sub-bacia Restante. Destaca-se a queda sensível que esses valores sofrem quando o solo encontra-se úmido, o que acontece justamente nos meses mais chuvosos, onde são maiores os casos de enchente.

A partir da análise da Tabela 8, observa-se que, em condições normais do solo, as APP presentes na sub-bacia Leopoldino 1 fornecem eficiência de, no máximo; 0,94% na atenuação das vazões de pico, o que equivale a 0,24 m³/s. Ao contrário da baixa eficiência nas vazões de pico, com relação à redução dos volumes, as APP reduzem 4,94% o que equivale a 14.739 m³.

Tabela 8. Eficiência da APP na sub-bacia Leopoldino 1 na atenuação de vazões e redução de volumes.
Table 8. APP efficiency in the sub-basin Leopoldino 1 in attenuating flows and reduced volumes.

	Eficiência na atenuação de vazões %		Eficiência na redução de volumes %	
	solo normal	solo saturado	solo normal	solo saturado
1º	0,72	0,08	4,93	1,62

2º	0,84	0,13	4,94	1,66
3º	0,81	0,24	4,92	1,64
4º	0,94	0,30	4,90	1,61

As APP dessa sub-bacia possuem baixa eficiência na atenuação de vazões e maior eficiência na redução dos volumes, já que atenuam apenas 0,13 m³/s, para chuva com probabilidade de 50% no primeiro quartil e reduzem até 21,4% dos 68.978 m³ (máximo acréscimo), no cenário 3 para chuva com probabilidade de 50% no segundo quartil. Esse resultado é justificado pelo fato dessas APP, apesar de corresponderem a 8,28% da área total da sub-bacia, situarem-se a montante dos reservatórios de detenção, não fazendo grande diferença nas vazões de pico, somente nos volumes. Ressalta-se aqui a queda que esses valores sofrem quando o solo encontra-se saturado.

CONCLUSÕES

As áreas permeáveis contribuem para amortecimento de vazões e para redução dos volumes escoados, principalmente quando o solo está em condições de umidade antecedente normais ou seco. Nas condições de solo úmido, conclui-se que essa eficiência foi bastante reduzida, o que acontece justamente nos meses mais chuvosos, onde são maiores os casos de enchente.

Conclui-se que as simulações mostraram que a retirada das APP urbanas nas sub-bacias com alto grau de impermeabilização, não influenciou expressivamente em termos de macrodrenagem. Deve-se ressaltar que isto não significa que essas áreas possam ser suprimidas, até porque isto seria ilegal.

Com relação à eficiência das APP na atenuação das vazões de pico e redução do volume de escoamento superficial; conclui-se que as APP mais eficientes foram aquelas presentes na sub-bacia Restante. Isto foi verificado pelo fato dessas APP corresponderem

relativamente a grandes áreas dentro da referida sub-bacia. Apesar de também terem grande representação na área da sub-bacia correspondente, as APP da sub-bacia Leopoldino I tiveram baixa eficiência na atenuação das vazões de pico, porque estas encontram-se a montante dos reservatórios de detenção. Dessa forma, a presença da APP apenas reduz a vazão de entrada nos reservatórios, os quais são os grandes responsáveis pelo amortecimento de cheias nessa sub-bacia. A APP com menor eficiência, tanto em atenuação de vazão quanto em volume, foi a localizada na Sub-bacia Santos Dumont, devido a sua pequena área, correspondendo a apenas 1% da área total da sub-bacia.

De uma maneira geral, os resultados deste estudo mostram que a quantidade de APP presentes na bacia do córrego das Lajes é insuficiente para o amortecimento de cheias (baixa eficiência na atenuação das vazões de pico e na redução do volume de escoamento superficial). Isto ressalta a importância da preservação de outras áreas permeáveis, sendo pela transformação destas em áreas verdes e/ou limitação da taxa de impermeabilização nos lotes. Medidas como estas trariam benefícios sociais, ambientais, proporcionando lazer, restauração ecológica e também contribuiriam na macrodrenagem urbana, auxiliando no controle de cheias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. **Código Florestal**. Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012.

BUCCHERI FILHO, A. T. ; NUCCI, J. C. Espaços Livres, Áreas Verdes e Cobertura Vegetal no Bairro Alto da XV, Curitiba/PR. **Revista do Departamento de Geografia**. 2006. Disponível em: http://143.107.240.111/publicacoes/RDG/RDG_18/RDG18_048_%20059.pdf
Acesso em: 05 de maio de 2007

CAMARA, G.; et al. [SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling](#). *Computers & Graphics*, 20: (3) 395-403, May-Jun. 1996.

CALIFORNIA DIVISION OF HIGHWAYS (CDH). “**California culvert practice**.” Dept. of Public Works, Division of Highways, Sacramento, CA. 1960

DA LUZ, J.H.V. Conditions governing the use of approximations for the Saint-Venant equations for shallow surface water flow. **Journal of Hydrology**. V.60, Issues 1–4, January 1983, Pages 43-58

DA PAZ, A.R et al. Simulação Hidrológica de Rios com Grandes Planícies de Inundação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 15 n.4 Out/Dez 2010, 31-43

FERNANDES, A. L. T. et al. Avaliação do método Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.3, p.270–276, 2011.

HUFF, F. A. **Urban effects on storm rainfall in Midwestern United States**. Proceedings of the Amsterdam Symposium. Effects of urbanization and industrialization on the hydrological regime and on the water quality, october, publ. IAHS n. 123, pp 12-19. 1977

JUSTINO, E. A.; MARTINS DE PAULA, H.; PAIVA, E. C. R. Análise do efeito da impermeabilização dos solos urbanos na drenagem de água pluvial do município de Uberlândia-MG. **Espaço em Revista**. vol. 15, nº 1 , 2011.

MORAIS, O. R. de. **Enchentes em Uberaba**. (Monografia de Especialização). Faculdade de Agronomia e Zootecnia de Uberaba – FAZU, Uberaba, 2001.

MORRIS, E.M., The effect of the small slope approximation and lower boundary conditions on solutions of the Saint-Venant equations. Journal of Hydrology. 1979.V.40: 31-47

MORUZZI,, R. B. et al. Aplicação de modelos hidrológicos para avaliação de reservatórios de retenção e detenção combinados à obra de recuperação do canal de macrodrenagem no controle de cheias em uma bacia hidrográfica urbanizada. **Ciência & Engenharia**, v. 18, n. 1/2, p. 11 – 20, jan. – dez. 2009

NASCIMENTO, N.O *et al.* **Estudo do Sistema de MacroDrenagem da Cidade de Uberaba: Bacia Hidrográfica do Córrego das Lajes - Relatório Parcial 2/2005: diagnóstico**. Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia/Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. 2005

NAVARRO, E. C. **Influência da Urbanização na vazão máxima da Microbacia Hidrográfica do Córrego da Cachoeirinha, Lençóis Paulista, SP**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu. Botucatu, SP, 2013.

NUNES, F. G.; FIORI, A. P. Análise da impermeabilização dos solos e aumento dos picos de vazão de cheias em bacias hidrográficas urbanas. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 62-63, p. 47-60, 2008.

RODRIGUES, V. A. Análise dos processos hidrológicos em modelo didático de microbacias. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal Garça**, v.17, n.1, p. 1-15, 2011.

SHARIFI, S.; HOSSEINI, S.M. Methodology for Identifying the Best Equations for Estimating the Time of Concentration of Watersheds in a Particular Region. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. Volume 137, Issue 11. November 2011.
SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **Urban Hydrology for Small Watersheds**. USDA. Soil Conservation Service Technical Release n.55, Washington DC

SOUSA, J. S. de. **Áreas de Preservação Permanente Urbanas: mapeamento, diagnósticos, índices de qualidade ambiental e influência no escoamento superficial – Estudo de caso: Bacia do Córrego das Lajes, Uberaba/MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

STRELKOFF. T. Numerical solution of Saint-Venant equations. **Journal of the Hydraulics Division**. 1970

TOMAZ, P. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras Municipais**. São Paulo, Editora: Navegar, 2002.

TUCCI, C.E.M. Plano Diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** . Volume 2 n.2. Jul/Dez 1992, 5-12

TUCCI, C.E.M. Parâmetros do Hidrograma Unitário para Bacias Urbanas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 8 n.2. Abr/Jun 2003, 195-199

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2005

ZUFFO, A. C.; LEME, P. E. Gradex e Santa Bárbara: método híbrido para cálculo de vazão de projeto para macro drenagem urbana. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. João Pessoa - Paraíba. 2005. Disponível em:
http://www.artigocientifico.com.br/uploads/artc_1150910336_11.pdf Acesso em: 15 de janeiro de 2007.