

ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM CANAL NATURAL: IMPACTO DA URBANIZAÇÃO

TEIXEIRA, C.F.A¹; DAMÉ, R.C.F.²; SIQUEIRA, G.A.³; BACELAR, L.C.S.D.⁴; GARRÉ, S.O.³

¹Eng. Agrícola, Professora Adjunta do Centro de Engenharias, UFPel, Pelotas – RS. Fone: (0XX14) 3275-7165, e-mail: cfteixe@ig.com.br.

²Eng. Agrícola, Professora Associada do Centro de Engenharias, UFPel, Pelotas – RS.

³Acadêmico do Curso de Engenharia Agrícola, UFPel, Pelotas – RS.

⁴Acadêmico do Curso de Meteorologia, UFPel, Pelotas – RS.

ABSTRACT: The objective was to estimate the inflow and outflow hydrographs for a natural channel located in the river basin of Mirim / RS / Brazil, considering the current conditions of occupation and future scenarios. We used a portion of the channel with 3 km long slope of 0.0003 m m⁻¹, height of 2 m and 60 m wide. The hydrographs tributaries were propagated using the model Muskingun Cunge-linear. Under current conditions of urbanization maximum flow value was 225.03 m³ s⁻¹. Whereas increases were 10, 20 and 30% in the runoff coefficient were obtained percentage increases in peak flows of 255.22, 276.40 and 303.55 m³ s⁻¹, respectively. The results suggest that structural and / or non-structural measures are taken to contain the flood, since there was an increase of up to 35% at maximum flow.

Key-Words: Propagation of outflows, Musking-Cunge, sealing surface.

INTRODUÇÃO

O crescimento urbano das cidades brasileiras tem provocado impactos significativos, tanto na qualidade de vida da população quanto no meio ambiente, os quais acarretam aumento da frequência e do nível das inundações. Nesse sentido, as cidades sem planejamento prévio desencadeiam os impactos citados, principalmente quando não são considerados o controle do uso do solo, a ocupação de áreas de risco e os sistemas de micro e macrodrenagem, quando da ocupação do espaço urbano (Vendrame e Lopes, 2005).

Uma vez que com o desenvolvimento urbano a cobertura vegetal é modificada, ocorre a alteração dos componentes do ciclo hidrológico natural. O fato de a cobertura da bacia ser alterada por pavimentos impermeáveis e serem introduzidos condutos para escoamento pluvial, ocorre a redução da infiltração da água no solo, aumento do escoamento superficial e redução do nível do lençol freático e da evapotranspiração (Dias et al., 2002).

Devido aos impactos da urbanização sobre os componentes do ciclo hidrológico é importante, em termos de planejamento dos recursos hídricos, que se conheça antecipadamente as consequências dos mesmos. Uma das formas é estabelecer cenários de ocupação da bacia hidrográfica ao longo do tempo e, para cada cenário definido, conhecer o comportamento dos componentes do ciclo hidrológico. No caso específico do escoamento superficial sobre a bacia hidrográfica pode-se utilizar modelos hidrológicos que simulem o hidrograma resultante para cada cenário. Em função dos hidrogramas simulados, oriundos dos diversos cenários estabelecidos, é possível utilizar os modelos hidrológicos de propagação de vazões em reservatórios e/ou canais, se for o caso, com o propósito de conhecer o escoamento da água na referida bacia hidrográfica.

Paiva (2009) com o objetivo de propor uma metodologia para realizar a simulação hidrológica e hidrodinâmica integrada em grandes bacias utilizou como material de estudo alguns rios da bacia amazônica. O autor estabeleceu quatro cenários comparados com um cenário padrão, sendo as simulações realizadas utilizando um modelo hidrodinâmico. Para tanto foi considerado o efeito do armazenamento nas planícies de inundação e, ao mesmo tempo, desconsiderado a influência da variação das áreas alagadas no balanço hídrico, contemplando as condições de contorno de vazões observadas nos rios Solimões e Japurá. No cenário 1, o autor utilizou o modelo Muskingun-Cunge para simular o escoamento em todos os trechos de rio da bacia do rio Solimões, já no Cenário 2 a diferença do cenário padrão está por desconsiderar o armazenamento d'água na planície de inundação. O objetivo deste cenário é avaliar a influência da planície de inundação e do termo de pressão da equação dinâmica na representação do escoamento em grandes rios. No Cenário 3 foram consideradas como variáveis, as áreas das unidades de resposta hidrológica de cada minibacia, em função da área inundada simulada pelo modelo hidrodinâmico. Já o Cenário 4 foi idêntico ao padrão, com exceção da utilização de vazões observadas como condição de contorno nos rios Solimões e Japurá.

Gomes et al. (2008) utilizaram o modelo *LIMBURG SOIL EROSION* (LISEM) para simular o escoamento superficial em uma bacia tropical. Os autores avaliaram a influência de diversos cenários sobre o escoamento superficial direto, considerando como cenários, diferentes valores de umidade do solo

anterior aos eventos de precipitação pluvial, bem como a espessura da camada de solo considerada no balanço hídrico. As variáveis de entrada do modelo foram calibradas para eventos individuais de precipitação pluvial ocorridos na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, da região Alto Rio Grande, MG. Os autores concluíram que o modelo hidrológico LISEM apresentou resultados satisfatórios na simulação hidrológica do escoamento superficial direto, mostrando que pode ser aplicado para previsão do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas tropicais, desde que devidamente calibrado. No entanto os autores verificaram, ainda, que quanto à calibração do modelo, este apresentou elevada sensibilidade à umidade do solo, sendo esta sua principal variável de calibração. A influência da espessura da camada de balanço hídrico ficou associada à umidade de calibração, observando-se que, quanto maior a profundidade, maior a umidade requerida para calibrar o modelo.

A utilização de diversos cenários para prever o comportamento do escoamento superficial só é possível devido a existência dos modelos hidrológicos, que são ferramentas destinadas a representar o mundo real de maneira simplificada, mediante um conjunto de equações, ou mesmo, uma sequência lógica de operações implementadas em um programa computacional (Moradkani et al., 2005). A modelagem matemática está presente na prática hidrológica como uma das principais ferramentas utilizadas em projetos de engenharia e avaliações ambientais. Particularmente, os modelos hidrológicos de larga escala têm sido aplicados em avaliações de impactos de mudança da cobertura vegetal e variabilidade climática e em sistemas de previsão (Paiva, 2009).

Os modelos de propagação de escoamento superficial sobre a bacia hidrográfica proposto pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos (SCS, 1972) e o modelo Muskingun-Cunge (Tucci, 2005) utilizado na propagação de vazões em canal, são largamente utilizados quando a situação de projeto adequa-se às condições de contorno dos referidos modelos. Assim, quando se utiliza um modelo concentrado para a propagação do escoamento sobre a bacia, é possível a utilização do modelo SCS (1972), bem como quando não ocorrem efeitos de jusante sobre o escoamento e a planície de inundação não está presente, é permitido o uso do modelo Muskingun-Cunge.

A bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata inserida na bacia hidrográfica da lagoa Mirim/RS/Brasil, começou a despertar interesse de estudo sobre seu comportamento hidrológico, a partir da ocorrência de um evento extremo de precipitação pluvial ocorrido no mês de janeiro do ano de 2009, em que a lâmina precipitada na sua nascente foi de 600 mm em 24 h (Bertoldi, 2009). O volume de escoamento superficial decorrente deste evento, bem como o valor correspondente de vazão máxima, causou danos a vidas humanas e também a obras estruturais contidas na bacia hidrográfica. Diante desta realidade, o objetivo do presente trabalho foi estimar os hidrogramas afluente e efluente para um trecho do arroio Moreira/Fragata, considerando as condições atuais de ocupação e as de cenários futuros.

METODOLOGIA

Para realizar o presente trabalho foi utilizada uma sub-bacia rural com área de 182,63 km², pertencente a bacia do arroio Moreira/Fragata/RS/Brasil. O trecho de canal natural utilizado possui 3 km de comprimento, declividade de 0,0003 m m⁻¹, altura de 2 m, 60 m de largura e coeficiente de rugosidade de Manning 0,04, considerando seções regulares e valor médio para canais de grande porte.

Na estimativa do hietograma de projeto efetivo foi utilizado o método do Soil Conservation Service (SCS, 1972; Singh et al., 2008), o qual considera a relação entre o armazenamento máximo, S (mm); a precipitação máxima acumulada, P (mm); a precipitação efetiva acumulada, Pe (mm); a quantidade armazenada no instante (P - Pe); as abstrações iniciais, Ia, (0,2 x S) e o parâmetro curva número, CN; sendo a precipitação efetiva obtida pelas seguintes relações:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (1)$$

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

Obteve-se o hietograma efetivo da seguinte forma: (a) obtenção da lâmina efetiva para cada duração (Eqs. 2 e 3) e (b) cálculo dos incrementos da lâmina efetiva acumulada, por intervalo de tempo. Para obtenção do hidrograma de projeto foram estimados os parâmetros do hidrograma unitário sintético triangular do SCS (1972), cuja metodologia consistiu, inicialmente, da estimativa do Hidrograma Unitário Curvilíneo da área em estudo, adotando-se um valor de duração da chuva:

$$t_r = 0,133t_c \quad (3)$$

em que,

t_r - duração da chuva (h);
 t_c - tempo de concentração (h).

Conhecendo a duração da chuva de projeto, foi calculado o tempo entre a metade da precipitação e o instante de pico (t_p), pela expressão:

$$t_p = 0,6t_c \quad (4)$$

O tempo de instante do pico (T_p) foi obtido pela expressão:

$$T_p = \left(\frac{t_r}{2} \right) + t_p \quad (5)$$

E o tempo entre o início e o fim do escoamento superficial, ou seja, o tempo de base (t_b) por:

$$t_b = 2,67 \left(\frac{t_r}{2} + t_p \right) \quad (6)$$

Finalmente a vazão de pico (Q_p) foi encontrada mediante a equação (7):

$$Q_p = \left(\frac{0,208A}{T_p} \right) \quad (7)$$

em que,

A - área de drenagem expressa (km^2);
 T_p - tempo de instante de pico (h).

A partir dos valores obtidos de T_p e Q_p , obtiveram-se as ordenadas do Hidrograma Unitário da Área, através do Hidrograma Unitário Adimensional (SCS, 1972). Para a estimativa do hidrograma de escoamento superficial foram utilizadas as ordenadas do hidrograma unitário e os valores de precipitação excedentes obtidos a partir dos hietogramas efetivos.

O hietograma de projeto foi estimado utilizando-se a equação de chuvas intensas do município de Pelotas/RS (Goulart et al., 1992), aplicando-se o método dos blocos alternados para estimar a distribuição temporal da precipitação (Damé et al., 2010), com duração igual ao tempo de concentração e período de retorno 100 anos. O tempo de concentração foi estimado utilizando-se a equação de Watt & Chow, segundo Dingman (2002).

Na aplicação do método de estimativa da chuva efetiva foi considerado o parâmetro CN igual a 73 para a situação atual, em função das características de uso, tipo e conteúdo de água no solo. A previsão dos cenários futuros, fundamentado num acréscimo de impermeabilização de 10, 20 e 30%, levou a valores de CN de 76, 79 e 82, respectivamente.

Para a propagação no trecho do arroio foi utilizado o modelo Muskingun-Cunge (Wigmosta et al., 1994; Villanueva et al., 2005), que relaciona a vazão de saída do trecho do arroio em um intervalo de tempo (Δt), às vazões de entrada (Q_a) e saída (Q_e) no intervalo de tempo anterior (Δt) e à vazão de entrada (Q_a) no intervalo atual (Δt).

Os parâmetros do modelo Muskingun-Cunge são calculados com base nos dados de comprimento (L), declividade (S_0), rugosidade (n) e largura média (B) no trecho do arroio. O comprimento e a declividade foram obtidos do mapa topográfico da área. A largura foi obtida com base em uma relação com a área de drenagem válida para a bacia, e a rugosidade foi estimada com base em observações locais, fotografias e informações sobre material do leito.

O modelo Muskingun (Tucci, 2005) utiliza a seguinte equação da continuidade e a equação de armazenamento:

$$S = K[XI + (1 - X)Q] \quad (8)$$

Derivando a equação (8) com relação ao tempo e substituindo na equação da continuidade, resulta em uma equação diferencial do modelo, cuja discretização por diferenças finitas, resulta:

$$Q_{t+1} = C_1 I_{t+1} + C_2 I_t + C_3 Q_t \quad (9)$$

em que,

$$C_1 = \frac{-KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - X) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - X) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (11)$$

$$C_3 = \frac{K(1 - X) - \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - X) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (12)$$

Para estimar os parâmetros K e X foi utilizada a metodologia apresentada por Cunge (1969), a partir de considerações do termo de difusão numérico e real, obtendo:

$$X = 0,5 \left(1 - \frac{Q_{ref}}{BS_0 Cel \Delta x} \right) \quad (13)$$

em que:

B - base do canal (m);

S₀ - declividade (m m⁻¹);

Δx - comprimento do trecho (m);

Q_{ref} - vazão de referência para determinação dos parâmetros, normalmente 2/3 Q_{máx} (m³ s⁻¹);

Cel - celeridade da onda (m s⁻¹), determinada conforme a equação (14).

$$Cel = \frac{5 S_0^{0,3} Q_{ref}^{0,4}}{3 n^{0,6} B^{0,4}} \quad (14)$$

em que,

n - coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional).

A representação física do parâmetro X é referente ao peso da integração da vazão no espaço, e o seu intervalo de variação é $0 \leq X \leq 0,5$, enquanto que o parâmetro K tem unidade de tempo e representa o tempo médio de deslocamento da onda entre montante e jusante do trecho, e é determinado segundo a equação (15):

$$K = \frac{\Delta x}{Cel} \quad (15)$$

A região válida dos parâmetros X e K está representada na equação (16):

$$2X \leq \frac{\Delta t}{K} \leq 2(1 - X) \quad (16)$$

O modelo Muskingun-Cunge só pode ser utilizado se for cumprida a exigência da equação (17):

$$T \geq \frac{30}{S_0 \sqrt{\frac{g}{h_0}}} \quad (17)$$

em que,

- T - período da onda de cheia (min);
- S_0 - declividade do canal ($m\ m^{-1}$);
- G - aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$);
- H_0 - profundidade máxima do canal (m).

Caso não seja cumprida a equação 17, a propagação será realizada utilizando um modelo de remanso ou hidrodinâmico.

DESCOBERTAS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 estão representados os hidrogramas afluentes ao trecho de canal natural considerando as condições atuais e futuras, para os valores do parâmetro CN iguais a 73, 76, 79 e 82. Verifica-se que para a seção de interesse, há um comportamento similar entre os diversos hidrogramas. Os picos de vazão, considerando a variação dos valores do parâmetro CN foram 237,89, 265,70, 294,85 e 325,36 $m^3\ s^{-1}$, representando um acréscimo percentual de 11,7, 23,9 e 36,8%, em relação à condição atual, respectivamente. Pedrosa (1996) alerta que o parâmetro CN é muito sensível, ou seja, pequenas variações em seu valor provocam grandes alterações nos volumes escoados e nos picos dos hidrogramas. Assim uma fiel avaliação de seu valor é de importância fundamental.

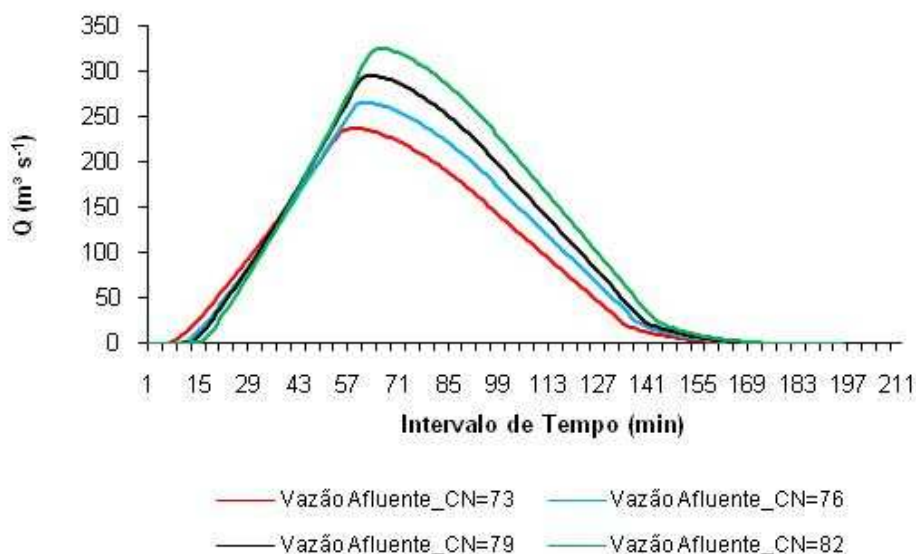
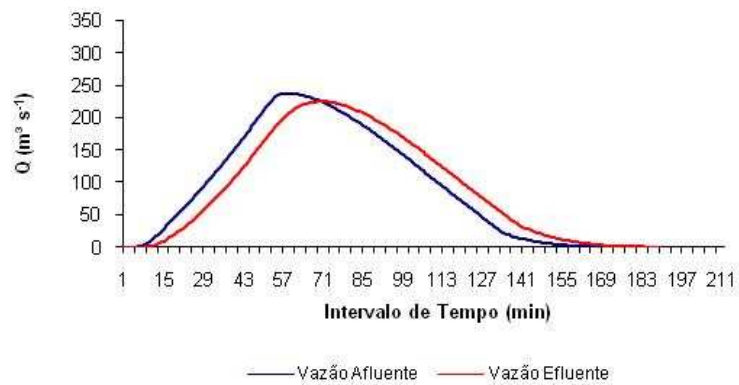


Figura 1 - Hidrogramas afluentes ao trecho de canal natural considerando as condições atuais e os cenários futuros, para os valores do parâmetro Curva Número iguais a 73, 76, 79 e 82.

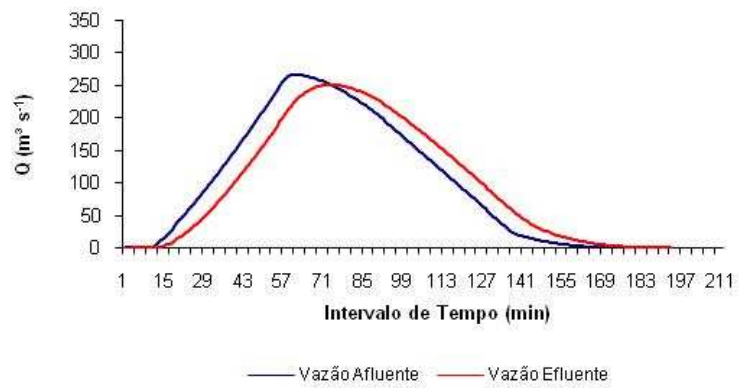
Os hidrogramas afluentes e efluentes para cada um dos casos analisados, que permitem o cálculo do amortecimento e da translação da onda de cheia e período de retorno 100 anos estão apresentados na Figura 2. Nota-se que o pico do hidrograma para a condição atual (CN = 73) atinge valores máximos pouco superiores a 200 $m^3\ s^{-1}$ e nas condições futuras de uso e ocupação do solo, os valores máximos foram 255,22, 276,40 e 303,55 $m^3\ s^{-1}$, para os CN's 76, 79 e 82, respectivamente. McCuen (1975) numa discussão sobre a questão de obtenção de parâmetros de modelos hidrológicos para cenários futuros, concluiu que o conhecimento do planejamento previsto para a área, é essencial nesta predição. Através do tipo de ocupação do solo, da densidade demográfica, e dos tipos de habitações da região, previstas no

plano de desenvolvimento urbano, é possível avaliar alguns parâmetros do modelo hidrológico utilizado. Neste trabalho, a estimativa destes parâmetros foi baseada na previsão de ocupação considerando um acréscimo de impermeabilização de 10, 20 e 30%.

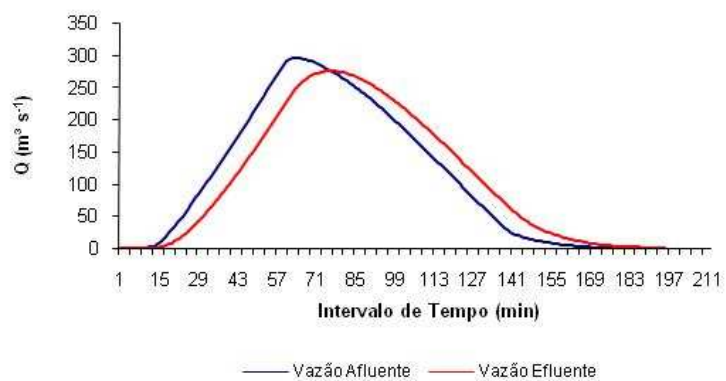
Cenário Atual



Cenário Futuro 1



Cenário Futuro 2



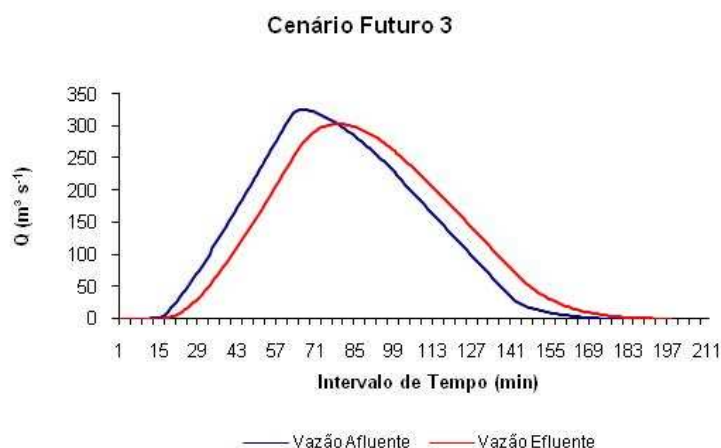


Figura 2 – Hidrogramas afluentes e efluentes em um trecho do arroio Fragata para os cenários atual e futuros, para o período de retorno de 100 anos.

Observa-se que há influência da impermeabilização do solo (maiores valores do parâmetro CN) e do aumento da velocidade do escoamento superficial sobre os picos dos hidrogramas, implicando no aumento das magnitudes das enchentes para a região em estudo. Com relação aos picos dos hidrogramas efluentes e determinando-se os valores de vazão específica para a área de drenagem do trecho de canal em análise ($182,63 \text{ km}^2$), os valores encontrados foram $1,23$ (CN = 73), $1,40$ (CN = 76), $1,51$ (CN = 79) e $1,66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (CN = 82) para os cenários atual e futuros, respectivamente. Tucci (1992) encontrou o valor de vazão específica de $4,51 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ para uma bacia de área de $112,00 \text{ km}^2$ e período de retorno de 50 anos, tempo de concentração de 16,5 horas, considerando de 35 a 60% de área impermeabilizada.

Através das simulações realizadas com relação ao estabelecimento de cenários futuros de acordo com as mudanças nos padrões de uso e ocupação do solo, foi possível constatar que as referidas alterações têm interferência direta, tanto sobre o escoamento superficial, como nos processos erosivos que venham a ser registrados na área.

CONCLUSÕES

Considerando-se acréscimos de 10, 20 e 30% no coeficiente de escoamento, obtiveram-se aumentos percentuais de vazões máximas de 255,22; 276,40 e $303,55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

A comparação entre os cenários evidencia como o uso do solo pode alterar as condições hidrológicas da área em estudo. Isso demanda ações que impliquem na diminuição da precipitação excedente e as conseqüentes vazões de escoamento superficial.

Além dessas questões vinculadas a área da pesquisa, foi possível constatar a importância da quantificação e análise das condições do escoamento superficial para a avaliação da dinâmica dos processos erosivos.

REFERÊNCIAS

BERTOLDI, C.R.C. Temporal causa prejuízos na Embrapa Clima Temperado, 2009. Disponível em:

<http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2009/janeiro/4a-semana/temporal-causa-prejuizos-na-embrapa-clima-temperado>. Acesso em: 26 maio 2011.

CUNGE, J.A. On the subject of a flood propagation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, v.7, n.2, 205-230, 1969.

DAMÉ, R.C.F.; TEIXEIRA, C.F.A.; TERRA, V.S.S.; ROSSKOFF, J.L.C. Hidrograma de projeto em função da metodologia utilizada na obtenção da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.14, n.1, p. 46-54, 2010.

DIAS, J.E.; GOMES, V.O.O; COSTA, M.S.G.C; GARCIA, J.M.P; GOES, M.H.B. Impacto ambiental de enchentes sobre áreas de expansão urbana no município de Volta Redonda/Rio de Janeiro. **Revista de Biociência**. Taubaté, v.8, n.2, p.19-26, 2002.

DINGMAN, S.L. **Physical Hydrology**. Prentice Hall, Upper Saddle River, 646p. 2002.

GOMES, N.M.G.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; BESKOW, S. Aplicabilidade do LISEM (LIMBURG SOIL EROSION) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 2483-2492, 2008.

GOULART, J.P.; MAESTRINI, A.P.; NEIBEL, A.L. Relação intensidade-duração-frequência de chuvas em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.7, n.1, p.543-552, 1992.

McCUEN, R.H. Flood Runoff from Urban Areas. College Park: University. of Maryland. 70f. (Technical Report n.33). 1975.

MORADKHANI, H.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H.V.; HOUSER, P.R. Dual-state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter. **Advances Water Resources**, v.28, p.135–147, 2005.

PAIVA, R.C.D. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: Bacia do rio Solimões. Porto Alegre: UFRGS - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 168p. Dissertação (Mestrado). 2009.

PEDROSA, V.A. O controle da urbanização na macrodrenagem de Maceió: Tabuleiro dos Martins. Porto Alegre: UFRGS - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 159p. Dissertação (Mestrado). 1996.

SCS – Soil Conservation Service. Hydrology. In: National engineering handbook. Washington: USDA, 1972. p.101-1023.

SINGH, P.K.; BHUNYA, P.K.; MISHRA, S.K.; CHAUBE, U.C.A sediment graph model based on SCS-CN method. **Journal of Hydrology**, v.349, p.244-255, 2008.

TUCCI, C.E.M. Estudos Hidrológicos e Hidráulicos do Ribeirão dos Meninos – Lote A; Simulação Hidráulica. Encibra - Estudos e Projetos Ltda, 1992, 110p.

TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005, 678p.

VENDRAME, I.F.; LOPES, W.A.B. Análise do crescimento urbano e seus efeitos na mudança da dinâmica do escoamento superficial da bacia do Pararangaba. **Anais**. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, INPE, p. 2555-2562, 2005.

VILLANUEVA, A.; ALLASIA, D.G.; NEVES, M.; TASSI, R.; BERNHARDT, S. IPHS1 para Windows – Manual de fundamentos. IPH – UFRGS. Porto Alegre. 76p. 2005.

WIGMOSTA, M.S.; VAIL, L.W.; LETTENMAIER, D.P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, v.30, n.6, p. 1665-1679, 1994.