

**JULIANA CRISTINA BRAGA**

**MODELO HIDROLÓGICO DE PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS PARA  
OBTENÇÃO DO HIDROGRAMA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL  
EM QUALQUER POSIÇÃO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "*Magister Scientiae*".

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
FEVEREIRO – 2000

**JULIANA CRISTINA BRAGA**

**MODELO HIDROLÓGICO DE PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS PARA  
OBTENÇÃO DO HIDROGRAMA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL**

Tese apresentada à Universidade  
Federal de Viçosa, como parte das  
exigências do Curso de Engenharia  
Agrícola, para obtenção do título de  
*“Magister Scientiae”*.

APROVADA: 29 de fevereiro de 2000.

Demetrius David da Silva  
(Conselheiro)

Edvaldo

Gilberto Chohaku Sedyama

Márcio Mota Ramos

Fernando Falco Pruski  
(Orientador)

## CONTEÚDO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	iv
EXTRATO.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Ciclo hidrológico e escoamento superficial.....	5
2.2. Fatores que intervem no escoamento superficial.....	7
2.3. Estimativas de escoamento superficial.....	9
2.4. Modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica.....	11
3. Metodologia.....	15
3.1. Divisão da bacia hidrográfica em células.....	16
3.2. Hidrograma de escoamento superficial.....	16
3.2.1 Hidrograma de escoamento superficial produzido na célula de interesse.....	19

3.2.2 Hidrograma de escoamento superficial advindo das células que contribuem com escoamento para a célula de Interesse.....	23
3.2.2.1. Hidrograma de escoamento superficial das células contribuintes localizadas na encosta.....	24
3.2.2.2. Hidrograma de escoamento superficial das células contribuintes localizadas no canal.....	28
3.3. Hidrograma de escoamento superficial na encosta.....	30
3.4. Hidrograma de escoamento superficial no canal.....	30
3.5. Volume de escoamento superficial.....	31
3.6 Desenvolvimento do software.....	31
3.6.1. Captura dos dados.....	33
3.6.2. Verificação da consistência dos dados.....	34
3.6.3. Decisão do tipo de hidrograma.....	34
3.6.4. Identificação das células contribuintes localizadas na encosta.....	34
3.6.5. Cálculo do hidrograma na encosta.....	34
3.6.6. Identificação das células contribuintes localizadas no canal.....	35
3.6.7. Cálculo do hidrograma no canal.....	35
3.7. Análise do comportamento do modelo para diferentes condições do canal e da Bacia. ....	36
3.7.1. Encosta regular.....	36
3.7.2. Encosta irregular.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1. Software desenvolvido.....	44
4.2. Avaliação do modelo.....	48
4.2.1. Encosta regular com solo saturado.....	48
4.2.2 Encosta regular e solo com umidade inferior à saturação.....	58
4.2.3. Encosta irregular com solo saturado.....	60
4.2.4. Encosta irregular e solo com umidade inferior à saturação.....	62

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
6. APÊNDICE.....	73

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	=	área da célula, m <sup>2</sup> .
aa	=	inclinação da parede de montante do canal, graus.
A <sub>b</sub>	=	área da bacia de drenagem, ha.
ARM	=	armazenamento superficial, mm.
bb	=	inclinação do terreno, graus.
C	=	coeficiente de escoamento superficial, adimensional.
col	=	número de colunas.
dim	=	dimensão da célula, m.
F <sub>x</sub>	=	fator de contribuição que representa a componente do escoamento associado a direção x, %.
F <sub>y</sub>	=	fator de contribuição que representa a componente do escoamento associado a direção y, %.
I	=	infiltração acumulada, mm.
ICV	=	interceptação pela cobertura vegetal, mm.
i <sub>i</sub>	=	intensidade instantânea de precipitação, mm h <sup>-1</sup> .

$i_m$	=	intensidade máxima média de precipitação, $\text{mm h}^{-1}$ .
$K, a, b, c$	=	parâmetros da equação de chuvas intensas.
$K_s$	=	condutividade hidráulica do solo saturado, $\text{mm h}^{-1}$ .
$L$	=	comprimento da bacia, m.
$L_c$	=	comprimento do canal, m.
$L_e$	=	comprimento da encosta, m.
$n_c$	=	coeficiente de rugosidade de Manning para o canal, $\text{s m}^{-1/3}$ .
$n_t$	=	coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning para a superfície da encosta, $\text{s m}^{-1/3}$ .
$Q_c[i,j,t]$	=	vazão de escoamento sobre o canal apresentada pela célula $[i,j]$ para um tempo igual a $t$ , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .
$Q_{cc}$	=	vazão que contribui com escoamento para a célula de interesse localizada no canal.
$Q_{ce}$	=	vazão que contribui com escoamento para célula de interesse localizada na encosta, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .
$Q_{\text{célula}}$	=	vazão de escoamento produzida na célula, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .
$Q_{\text{célula}}[i\pm 1, j\pm 1, t+t_d]$	=	vazão de escoamento sobre a superfície do terreno apresentada pelas células que contribuem com escoamento para a célula de interesse, para um tempo $t+t_d$ , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .
$Q_{\text{célula}}[i\pm 1, j\pm 1, t+t_{dcan}]$	=	vazão de escoamento sobre a superfície do terreno, apresentada pelas células que contribuem com escoamento para a célula de interesse, para um tempo $t+t_d$ , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .
$Q_e[i,j,t]$	=	vazão de escoamento sobre a superfície do terreno apresentada pela célula $[i,j]$ para um tempo igual a $t$ , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .
$q_{Es}$	=	taxa de ocorrência do escoamento superficial produzida na célula de interesse, $\text{mm h}^{-1}$ .
$Q_H$	=	vazão máxima de escoamento superficial obtida pelo Hidrograma 1.0, $\text{L s}^{-1}$ .
$Q_R$	=	vazão máxima de escoamento superficial obtida pelo método racional, $\text{L s}^{-1}$ .

$Q_I$	=	vazão máxima de escoamento superficial obtida para a condição inicial.
$Q_M$	=	vazão máxima de escoamento superficial obtida para uma das simulações do modelo, $L s^{-1}$ .
$Q_{max}$		vazão máxima de escoamento superficial, $m^3 s^{-1}$ .
$S_c$	=	declividade do canal, $m m^{-1}$ .
$S_m$	=	declividade da parede de montante do canal, $m m^{-1}$ .
$S_s$	=	declividade da superfície, $m m^{-1}$ .
$S_t$	=	declividade da encosta, $m m^{-1}$ .
$S_w$	=	potencial matricial do solo, mm.c.a.
$t$	=	duração da chuva, min.
$T$	=	período de retorno, anos.
$t_{(ARM)}$	=	tempo de início do empoçamento, min.
$t_{(ICV)}$	=	tempo de duração da interceptação pela cobertura vegetal, min.
$t_{(PRE)}$	=	tempo para o qual a capacidade de armazenamento de água sobre a superfície do solo encontra-se preenchida, min.
$t_c$	=	tempo de concentração, min.
$t_d$	=	tempo de deslocamento do escoamento superficial, min.
$t_{f(ES)}$	=	tempo para o qual cessa o escoamento superficial.
$t_{i(ARM)}$	=	o tempo de início de ocorrência da fase de armazenamento superficial, min.
$V_H$	=	Volume de escoamento superficial obtido pelo Hidrograma 1.0, L.
$VI$	=	velocidade de infiltração da água no solo, $mm h^{-1}$ .
$V_I$	=	volume de escoamento superficial obtido para a condição inicial, L.
$V_M$	=	volume de escoamento superficial obtido para uma das simulações do modelo, L.
$y_{[i\pm 1, j\pm 1, t]}$	=	lâmina de escoamento superficial sobre a superfície da

		encosta, no tempo $t$ , m.
$Y_{\text{can}}$	=	altura da lâmina d'água na seção do canal, m.
$\Delta Q_H$	=	diferença percentual entre as vazões máximas obtidas pelo modelo proposto e Hidrograma 1.0, %.
$\Delta Q_I$	=	diferença percentual entre a vazão máxima obtida para uma das simulações em relação à condição inicial, %.
$\Delta Q_R$	=	diferença percentual entre as vazões máximas obtidas pelo modelo proposto e método racional, %.
$\Delta V_H$	=	diferença percentual entre as volumes obtidos pelo modelo proposto e Hidrograma 1.0, %.
$\Delta V_I$	=	diferença percentual entre os volumes obtidos para uma das simulações em relação à condição inicial, %.
$\theta_i$	=	umidade inicial do solo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .
$\theta_s$	=	umidade de saturação do solo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

## EXTRATO

BRAGA, Juliana Cristina, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2000. **Modelo hidrológico de parâmetros distribuídos para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em qualquer posição de uma bacia hidrográfica.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Conselheiros: Demetrius David da Silva e José Luis Braga.

Desenvolveu-se uma metodologia que permite obter o hidrograma de escoamento superficial ao longo de uma bacia hidrográfica. Considerou-se a variabilidade espacial das condições bacia dividindo a mesma em diversas células seguindo a filosofia do Sistema de Informação Geográfica. Para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial na célula de interesse somou-se o hidrograma produzido na mesma com os hidrogramas advindos das células que contribuem com escoamento para a célula de interesse, empregando para isso um modelo de balanço hídrico. Para possibilitar a aplicação da metodologia desenvolvida, elaborou-se um software, denominado HIDROBACIA. Como resultado o software fornece o hidrograma de escoamento superficial para qualquer posição ao longo da bacia (encosta ou canal).

## **1. INTRODUÇÃO**

O escoamento superficial é o processo que corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relativo ao deslocamento da água sobre a superfície do solo e que acarreta vários problemas ao meio ambiente. Associado ao escoamento superficial ocorre o transporte de partículas do solo em suspensão, nutrientes químicos, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas que, além de causarem prejuízos diretos à produção agropecuária, também causam a poluição dos cursos d'água.

O processo erosivo decorrente do escoamento superficial promove problemas também em cursos e reservatórios d'água, tais como: redução da capacidade de armazenamento devido à sedimentação; redução do potencial de geração de energia elétrica em consequência da diminuição da capacidade de acumulação de água; elevação dos custos de tratamento da água; desequilíbrio do balanço de oxigênio dissolvido na água e prejuízos para o crescimento de espécies aquáticas; e aumento dos custos de dragagem (BARROSO e SILVA, 1992)

Estimativas das vazões máximas de escoamento superficial são freqüentemente necessárias tanto em bacias hidrográficas com ocupação agrícola quanto urbanas, e são de fundamental importância para o projeto de obras de engenharia, dimensionadas de modo a suportar vazões máximas decorrentes do escoamento superficial. No projeto de estruturas de controle de erosão e inundação são necessárias, também, informações sobre o escoamento superficial. Quando o objetivo é reter ou armazenar toda água, o conhecimento do volume escoado é suficiente. Por outro lado, se o problema é conduzir o excesso de água de um lugar para o outro, a vazão de escoamento superficial é mais importante, particularmente a vazão correspondente a um determinado período de retorno (SCHWAB et al., 1966).

A quantificação do escoamento superficial nem sempre é fácil. Em bacias desprovidas de instrumentação, a determinação do escoamento superficial é mais difícil e menos precisa do que em bacias instrumentadas. Estudo realizado pelo “Water Resources Council”, citado por BONTA e RAO (1992), enfatiza a dificuldade de aplicação dos procedimentos para estimar o escoamento superficial, e a imprecisão de alguns métodos costumeiramente usados para esta finalidade.

Além dos métodos empíricos, de uso generalizado em estudos hidrológicos para quantificar o escoamento superficial, uma outra forma de quantificar o escoamento superficial é por intermédio de sua estimativa feita pela modelagem hidrológica, realizada a partir de fundamentos físicos.

Modelos matemáticos que tentam retratar fenômenos da natureza devem ser aplicados principalmente para identificar a resposta hidrológica de microbacias não-instrumentadas, onde não há dados disponíveis para o ajuste de um modelo.

A demanda da sociedade por previsões hidrológicas mais confiáveis cresce à medida que aumentam os problemas advindos de inundações e o número de mortos decorrentes destas. Para o desenvolvimento de modelos hidrológicos mais eficientes, entretanto, são necessárias informações mais precisas sobre chuvas intensas, relevo do terreno, condições do solo e escoamento superficial. O

custo para obtenção destas informações, entretando, muitas vezes é alto (VELEZ et al., 1998).

A tradição científica de generalização é utilizada na hidrologia há um longo tempo. O uso de modelos busca simplificar a complexidade do mundo real, privilegiando os aspectos fundamentais de um sistema, às expensas dos detalhes. Para apresentar uma visão aproximada da realidade, um modelo deve ser simples o bastante para compreensão e uso, e complexo o suficiente para representar o sistema em estudo (ANDERSON e BURT, 1985).

Com o aumento da velocidade operacional dos computadores, numerosos modelos hidrológicos computacionais estão sendo desenvolvidos e utilizados para a avaliação e o planejamento de bacias hidrográficas. Na busca destes objetivos, os modelos variam em termos de complexidade, número de simulações realizadas e dados de entrada. Alguns desses modelos requerem grande base de dados por causa da grande variabilidade das condições da bacia. Recentemente, pesquisas têm adaptado Sistema de Informações Geográficas (SIG) para solucionar problemas relacionados à hidrologia e à qualidade da água.

WOOLHISER (1996) defende o uso de modelos físicos para a melhor compreensão do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica embora, saliente que deve-se ter certo grau de ceticismo quanto às predições obtidas com o uso destes modelos, visto que as novas técnicas utilizadas para obter descrições de comportamento hidrológico em microbacias, tais como os Sistemas de Informações Geográficas, não podem melhorar a precisão do modelo se a estrutura deste for distorcida ou aplicada numa escala imprópria.

Os SIGs tem sido usados mundialmente em estudos hidrológicos (JENSON 1991; VIEUX 1991). MOORE et al. (1991) associaram com sucesso os SIGs aos modelos hidrológicos, que constituem-se ferramentas de muita utilidade para a manipulação de grandes bancos de dados, variáveis no tempo e no espaço.

Tendo em vista a grande importância do desenvolvimento de uma metodologia que permita estimativas confiáveis da vazão e do volume de escoamento superficial em uma bacia hidrográfica, levando em consideração a

variabilidade espacial e temporal das condições da mesma, objetivou-se, com este trabalho, desenvolver um modelo hidrológico com parâmetros distribuídos, baseado em fundamentos físicos, para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial em qualquer local de uma bacia hidrográfica; e desenvolver um software para possibilitar o uso da metodologia proposta.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Ciclo hidrológico e escoamento superficial**

A realização de estudos hidrológicos associados a microbacias hidrográficas surgiu da necessidade de se descrever o balanço hídrico nestas, e de se compreender o comportamento dos processos que controlam o movimento da água e os impactos decorrentes das mudanças do uso do solo sobre a quantidade e disponibilidade de água (WHITEHEAD e ROBINSON, 1993).

O comportamento natural da água quanto as suas ocorrências, transformações e relações com a vida humana é bem caracterizado através do conceito de ciclo hidrológico.

Das fases básicas do ciclo hidrológico, o escoamento superficial é considerado a mais importante, pois a maioria dos estudos hidrológicos está ligado ao aproveitamento de água superficial e à proteção contra os fenômenos provocados pelo seu deslocamento (VILELLA, 1975).

Do volume total precipitado, parte é interceptada pela vegetação e o restante atinge a superfície do solo. O empoçamento da água nas depressões existentes na superfície do solo, somente começa a ocorrer a partir do momento em que a intensidade da precipitação excede a velocidade de infiltração, ou, quando a capacidade de acumulação da água no solo for ultrapassada. Esgotada a capacidade de retenção superficial, a água começa a escoar (LINSLEY et al., 1975; LUTHIN, 1973 e PRUSKI e SILVA, 1997).

Durante muito tempo predominou nos estudos hidrológicos um tipo de avaliação baseada apenas em dois componentes do ciclo hidrológico: a precipitação como principal parâmetro entrada, e o deflúvio como saída, com pequena consideração às fases de interceptação pela cobertura vegetal, armazenamento superficial, infiltração da água no solo ou evapotranspiração. No entanto, a compreensão do conjunto de processos físicos que ocorrem na bacia é imprescindível para interpretar os resultados obtidos, suas limitações e aplicabilidade a outras áreas (Mc CULLOCH e ROBINSON, 1993).

Para melhor análise do processo que descreve o escoamento superficial é necessário o entendimento de alguns fatores que antecedem a sua ocorrência, tais como a interceptação pela cobertura vegetal e o armazenamento superficial.

A interceptação pela cobertura vegetal é a retenção de parte da precipitação acima da superfície do solo (BLAKE, 1972). O volume retido retorna à atmosfera por meio da evaporação. Este processo interfere no balanço hídrico da bacia hidrográfica, tendendo a ocasionar uma redução na variação da vazão ao longo do ano, e um retardamento e redução do pico de cheias. A quantificação do impacto da cobertura vegetal sobre o escoamento é uma questão importante devido à interação com os outros processos como, por exemplo, a evaporação (TUCCI, 1993).

A importância da retenção de água através da interceptação pela cobertura vegetal tem conduzido ao desenvolvimento de vários modelos empíricos e conceituais para estimar a magnitude dessa perda. Modelos empíricos como os propostos por Horton (1919), Leonard (1961) e Helvey e Patric (1965), têm mostrado que a interceptação que ocorre num determinado período é

principalmente controlada pelo total precipitado e pelo número de chuvas intensas que ocorrem durante esse período (MOSES et al., 1999).

O armazenamento superficial ocorre em função de obstruções naturais e artificiais existentes na bacia hidrográfica responsáveis por acumular parte do volume precipitado (TUCCI, 1993). Este processo é influenciado pela cobertura do solo e pelas práticas agrícolas exercidas na sua superfície (BRAKENSIEK e RAWLS, 1982).

A soma da quantidade de chuva retida na cobertura vegetal e armazenada nas depressões do solo é considerada, em relação ao escoamento superficial, como perdas iniciais (DeCOURSEY, 1980). Essa soma tende a estabilizar-se no tempo e a infiltração a tornar-se constante (MARTINS, 1976).

## **2.2. Fatores que intervem no escoamento superficial**

O escoamento superficial sofre a influência de diversos fatores que facilitam ou prejudicam a sua ocorrência. Estes fatores podem ser de natureza climática, relacionados à precipitação, ou de natureza fisiográfica ligados às características físicas da bacia.

Segundo PRUSKI e SILVA (1997), o escoamento superficial pode ser influenciado por parâmetros agroclimáticos e fisiográficos. Os parâmetros agroclimáticos incluem:

- a) quantidade, intensidade e duração da precipitação: o escoamento superficial tende a aumentar com o aumento da magnitude, da intensidade e duração da precipitação, a qual constitui a principal forma de entrada de água para ocorrência do ciclo hidrológico;
- b) cobertura e condições de uso do solo: além de seus efeitos sobre as condições de infiltração da água no solo, exercem importante influência na interceptação da água advinda da precipitação; e
- c) evapotranspiração: representa importante fator para retirada de água do solo. Portanto, quanto maior for a evapotranspiração, menor deverá ser a umidade do solo quando da ocorrência de precipitação, e conseqüentemente, maior deverá ser a velocidade de infiltração.

Os parâmetros fisiográficos incluem:

- a) área, forma e declividade da bacia: quanto maior a área e a declividade da bacia, tanto maior deverá ser a vazão máxima de escoamento superficial que deverá ocorrer na seção de deságüe da referida bacia. Quanto mais a forma da bacia aproximar-se do formato circular, tanto mais rápida deverá ser a concentração do escoamento superficial e, conseqüentemente, maior deverá ser a vazão máxima deste;
- b) tipo de solo: interfere diretamente na velocidade de infiltração da água no solo e na capacidade de retenção de água sobre a superfície;
- c) topografia: além de influenciar na velocidade de escoamento da água sobre o solo, interfere também na capacidade de armazenamento de água sobre este, sendo que as áreas mais declivosas geralmente apresentam menor capacidade de armazenamento superficial do que as áreas mais planas;
- d) rede de drenagem: a existência de rede de drenagem com elevado grau de ramificação e altos valores de densidade de drenagem permite a rápida concentração do escoamento superficial, favorecendo, conseqüentemente, a ocorrência de elevadas vazões sobre a superfície do solo; e
- e) obras hidráulicas presentes na bacia: enquanto as obras hidráulicas destinadas à drenagem promovem o aumento da velocidade de escoamento da água na bacia e, conseqüentemente, uma concentração mais rápida do escoamento superficial produzido o aumento da vazão resultante, as obras hidráulicas destinadas à contenção do escoamento superficial resultam em redução da vazão máxima de uma bacia.

Ruprecht e Schofield, citados por SUAREZ (1995), concluíram em seu estudo que o decréscimo das perdas por interceptação e a diminuição da evapotranspiração promovem aumento do escoamento total.

SUAREZ (1995) comenta que os solos florestais apresentam maior taxa de infiltração da água da chuva em relação às áreas cultivadas, o que se deve a maior porosidade destes solos decorrente da penetração das raízes, ao maior

número de microorganismos e insetos e também em virtude da cobertura florestal, sendo assim a precipitação é rapidamente absorvida, evitando a sua perda por escoamento superficial.

A rugosidade superficial é uma propriedade dinâmica que influencia muitos processos que ocorrem na superfície do solo. Ela afeta a infiltração da água no solo, o armazenamento e o escoamento superficial, a refletância à radiação solar, a liberação de partículas do solo durante a erosão eólica e o perfil do vento sobre a superfície (Potter, 1990 citado por PRUSKI 1993).

MAHESHWARI e McMAHON (1992) constataram que a variação do coeficiente de rugosidade com a profundidade do escoamento é considerável. Quando os elementos rugosos estão submersos, a sua ação em retardar o escoamento é reduzida com o aumento da profundidade do escoamento.

Interações entre condições meteorológicas, operações de cultivo e textura do solo, trazem rápidas e significantes mudanças nas propriedades hidrológicas do solo (COORRADINI et al., 1998).

### **2.3. Estimativas de escoamento superficial**

Conforme MERTEN et al. (1994), os maiores problemas de erosão em encostas são causados pelo escoamento superficial devido a seu volume e velocidade.

Informações a respeito do volume de escoamento superficial são necessárias em estudos relacionados ao manejo da água e do solo, à eficiência dos métodos de preparo e cultivo do solo e planejamento de irrigação suplementar (PATHAK et al., 1989).

Existem muitos procedimentos para estimativa do escoamento superficial, porém são, em sua maioria, específicos para estimar as vazões máximas em bacias hidrográficas. Entre esses destacam-se: o método racional, o método de Cook, o hidrograma unitário e a fórmula de Mac Math. Em alguns casos, o que mais interessa não é a vazão máxima, mas o volume total escoado superficialmente. Dentre os métodos usados para calcular a estimativa desse volume, destacam-se o do balanço hídrico diário e o do Serviço de Conservação

dos Solos dos Estado Unidos. Ambos requerem o conhecimento da chuva de projeto e da capacidade de infiltração da água no solo (PRUSKI, 1993).

Em bacias desprovidas de instrumentação, a determinação do escoamento superficial é mais difícil e menos precisa do que em bacias instrumentadas. O método mais simples é o racional, que produz razoáveis estimativas das vazões máximas de escoamento superficial (CASTRO FILHO e BISCAIA, 1981). A simplicidade da aplicação desse método e a facilidade de conhecimento dos dados a serem considerados difundiram o seu uso, entretando, uma das grandes dificuldades de aplicação do método racional é a estimativa do tempo de concentração (GREGORY, 1982).

Kliber, citado por AKAN (1986), salienta que existem ao menos meia dúzia de fórmulas para calcular o tempo de concentração. A maioria dessas fórmulas são empíricas e limitadas às condições dos locais nos quais elas foram desenvolvidas.

Uma das equações para o cálculo do tempo de concentração é a derivada com base no método da onda cinemática, a qual é solução teórica das equações que regem o escoamento turbulento em um plano. É de se esperar que funcione bem em pequenas bacias, pois, neste caso, prevalece esse tipo de escoamento. A tendência, entretanto, é de que o valor do tempo de concentração seja superestimado à medida em que a bacia aumenta (PRUSKI e SILVA, 1997).

O método do número da curva proposto pelo Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos (SCS) para determinação do volume de escoamento superficial constitui, provavelmente, o procedimento mais utilizado para tal propósito (STUEBE et al., 1990).

PATHAK et al. (1989), salientam que algumas das principais deficiências do método do número da curva são: a) o modelo não considera os efeitos da rugosidade superficial, e b) uma vez que uma relação contínua entre a umidade do solo e o número da curva não é usada no modelo, pequenas variações no conteúdo água no solo podem resultar em uma mudança súbita no número da curva, o que pode acarretar uma variação irreal no valor do escoamento superficial calculado.

As equações de Manning e Darcy-Weisbach têm sido muito usadas para descrever o processo de escoamento sob regime turbulento e uniforme. Cada uma dessas equações contém coeficiente de rugosidade específico (PRUSKI, 1993).

Os modelos para o cálculo do escoamento superficial que utilizam a equação da continuidade e a equação quantidade de movimento, desprezando-se os termos de pressão e de inércia, são ditos modelos de onda cinemática. Os modelos distribuídos, como o de onda cinemática, permitem uma avaliação ao longo do sistema, podendo levar em conta características físicas da bacia, mas necessitam maior número de informações, nem sempre disponíveis (TUCCI, 1988).

Muitos modelos hidrológicos usam de alguma forma a equação de Green-Ampt para separar chuva intensa em escoamento superficial e infiltração. Segundo RISSE (1994), a equação de Green an Ampt (1911) é amplamente utilizada para modelar fluxo vertical da água no solo. Esta foi desenvolvida através de uma interação da lei de Darcy, assumindo a infiltração de uma superfície porosa, solos homogêneos e uniformes. Devido a essa simplicidade e versatilidade, o uso desta equação tem sido difundido e muitos pesquisadores tem modificado para aplicações específicas (Mein and Larson, 1973; Chu, 1978).

#### **2.4. Modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica**

Um modelo é uma representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Os modelos são necessários para monitorar o comportamento de sistemas naturais, para que seja possível prever a sua resposta a diferentes ações como precipitações extremas, modificações do uso do solo, estiagens, entre outras (TUCCI, 1998).

O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. O desenvolvimento desses modelos requerem mais e melhores informações sobre as chuvas intensas, escoamento

superficial, topografia, solos, entre outras. Essas informações são muitas vezes caras de serem coletadas e observadas (VÉLEZ et al., 1998).

Quanto mais complexos os sistemas hidrológicos considerados, mais desafiadores e necessários são os modelos. Os processos que são tratados de forma simplificada e com poucos detalhes podem comprometer os resultados (TUCCI, 1998).

Bacias com grande cobertura vegetal, onde os processos hidrológicos são muito mais verticais (interceptação e evapotranspiração) do que horizontais (escoamento) são tratadas de forma ineficaz pela maioria dos modelos. As limitações básicas dos modelos hidrológicos são a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos requerido por estes, além da dificuldade existente na formulação matemática de alguns processos e na simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos nestes processos (TUCCI, 1998).

Os métodos utilizados na hidrologia, até a década de 50, praticamente limitavam-se a indicadores estatísticos dos processos envolvidos. Com o advento da computação, ocorreu o aprimoramento de técnicas numéricas e estatísticas, gerando um desenvolvimento acelerado de outros modelos. Existe uma grande dificuldade para representar um sistema com comportamento não-linear, com uma grande heterogeneidade espacial e temporal. Os modelos distribuídos, agregados a modelos digitais de terreno e ao geoprocessamento, têm buscado melhorar a representatividade espacial e temporal do comportamento das diferentes partes da bacia. (TUCCI, 1998).

Os processos e os problemas em recursos hídricos dependem da combinação de diversos fatores como clima, relevo, solo, geologia, cobertura vegetal, entre outros fatores físicos. A maioria dos modelos busca uma representação mais detalhada nos processos dominantes como: infiltração, escoamento superficial e em rios e escoamento subterrâneo(TUCCI, 1998).

Numerosos modelos tem sido desenvolvidos para prever o escoamento superficial, a erosão e o transporte de sedimentos. Alguns desses modelos requerem grande base de dados por causa da distribuição espacial dos seus

parâmetros de entrada. Recentemente, pesquisas têm adaptado o Sistema de Informação Geográfica para solucionar problemas hidrológicos e de qualidade de água (MITCHELL et al., 1993).

Os modelos distribuídos, permitem uma avaliação ao longo do sistema, podendo levar em conta características físicas da bacia, mas necessitam maior número de informações, nem sempre disponíveis. A escolha do modelo depende dos objetivos do seu uso, da quantidade de dados disponíveis, das características da bacia e sua ocupação, da familiaridade do usuário com o modelo e do orçamento e cronograma previstos. (TUCCI, 1998).

MERZ e BÁRDOSSY (1998), verificaram em seu estudo que a variabilidade espacial das características de uma bacia hidrográfica, pode ter uma influência dominante no comportamento do escoamento superficial.

A representação do escoamento em todos os seus detalhes é difícil devido a grande heterogeneidade espacial das bacias. O uso de Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto tem composto a estrutura de alguns modelos visando a obtenção de informações físicas e climáticas das bacias levando em consideração a variabilidade espacial desses parâmetros (TUCCI, 1998).

Os Modelos Digitais de Elevação do terreno (MDE) e os SIGs se integram com os modelos hidrológicos. Os MDE ajustam os pontos altimétricos a um modelo que representa a morfologia do terreno. Com base no MDE é possível calcular nos mesmos e no SIG, características como: área, perímetro comprimento da rede de drenagem, declividade, para os módulos de discretização. Os SIGs estimam, com base nos mapas de solo, cobertura, uso do solo e outras características físicas, os parâmetros do modelo hidrológico (TUCCI, 1998).

Recentes pesquisas na área de SIG e tecnologias de hardware aumentam a capacidade de manipular grandes base de dados descrevendo detalhadamente características espaciais da superfície terrestre. Os dados de entrada do SIG podem estar no formato raster (matricial) ou vetorial. Oposta a base de dados de formato vetorial, a base de dados raster oferece um método prático de armazenar

as características da superfície da terra com valores de parâmetros digitais em elementos de “grid” quadrados. A bacia é dividida em células quadradas com tamanhos específicos de “grid”, e um valor único para representar a característica da superfície terrestre é atribuído a cada célula. Características da superfície terrestre tais como elevação, tipo de solo e uso do solo são obtidos por levantamentos de campo (como é o caso da classificação do solo) ou sensoriamento remoto (JULIEN, 1995).

A escolha de um tamanho de “grid” apropriado para as simulações não é um trabalho trivial. Na seleção do tamanho do “grid”, o usuário deverá encontrar um equilíbrio entre precisão, disponibilidade de dados e esforço computacional. A disponibilidade e precisão dos dados usados para calibração e verificação, devem também ser considerados. Pequenos tamanhos de “grid” são usados quando a variabilidade espacial dos parâmetros relevantes é conhecido em detalhes. Tamanhos de “grid” maiores podem ser preferidos quando a variabilidade espacial das características da BH não é significativa ou quando a eficiência computacional é uma preocupação (JULIEN, 1995).

Modelos hidrológicos com bases físicas empregam medições de campo ou sensoriamento remoto para descrever a variabilidade espacial da topografia, solos, vegetação, rede de drenagem, e chuvas intensas. Essas variáveis são usadas como entradas numéricas em algoritmos baseados no comportamento físico da infiltração e escoamento superficial. Modelos numéricos baseados no processo físico estão ganhando cada vez mais popularidade entre os hidrologistas com simulação da variabilidade espacial de infiltração e de chuvas, nas bacias hidrográficas. Esses tipos de modelos incorporam uma descrição da variabilidade espacial da bacia hidrográfica e chuvas intensas para resoluções consideravelmente melhor (JULIEN, 1995).

### **3. METODOLOGIA**

As etapas seguidas no desenvolvimento metodológico foram:

- divisão da bacia hidrográfica em células quadradas de mesmo tamanho, seguindo a filosofia do SIG (Sistema de Informação Geográfica);
- obtenção do hidrograma de escoamento superficial produzido em cada célula empregando o modelo do balanço hídrico, que considera os processos de precipitação, interceptação pela cobertura vegetal, infiltração da água no solo, armazenamento superficial e escoamento superficial;
- obtenção do hidrograma de escoamento superficial na célula de interesse pela soma do hidrograma produzido na mesma com os hidrogramas advindos das células que contribuem com escoamento para a célula de interesse;

- desenvolvimento de um software que permite a obtenção do hidrograma de escoamento superficial em qualquer posição de uma bacia hidrográfica; e
- avaliação do modelo, por meio de simulações realizadas para diferentes condições.

### **3.1. Divisão da bacia hidrográfica em células**

Para permitir a consideração da variabilidade espacial dos parâmetros de entrada do modelo proposto considerou-se a bacia hidrográfica como sendo dividida em diversas células quadradas de mesmo tamanho. Essa divisão seguiu a filosofia do SIG (Sistema de Informação Geográfica) que, com uma base de dados raster (imagem raster), permite armazenar as características associadas à superfície terrestre em elementos de células quadradas.

Para associar as células à superfície terrestre, cada uma delas foi identificada por uma linha  $i$ , coluna  $j$  e atributo  $z$ . A linha e a coluna referem-se à posição geográfica da célula em relação à superfície terrestre e o atributo  $z$  refere-se à característica da base de dados raster da bacia, que está sendo representada. Caso o atributo  $z$  represente uma área fora da bacia o seu valor é considerado igual a 0. A Figura 1 mostra a divisão da bacia realizada em uma imagem raster que representa o modelo digital de elevação do terreno.

### **3.2. Hidrograma de escoamento superficial**

No desenvolvimento do modelo para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial na célula de interesse foram feitas as seguintes premissas:

- precipitação uniforme em toda a área analisada;
- evaporação nula, por tratar-se de precipitações intensas e a umidade relativa do ar ser alta durante a ocorrência da chuva; e
- condições da superfície do terreno, do solo e da vegetação uniformes dentro de cada célula.

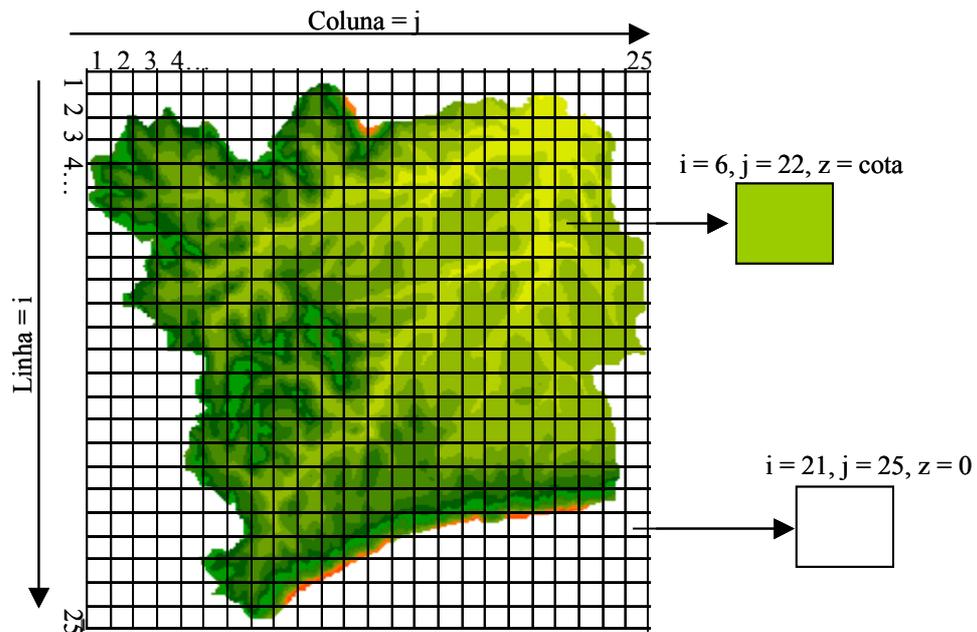


Figura 1 - Representação da divisão da bacia para aplicação do modelo.

O hidrograma de escoamento superficial para a célula de interesse foi obtido pela soma do hidrograma produzido nesta célula com os hidrogramas advindos das células vizinhas que contribuem com escoamento superficial para a célula de interesse. Para tanto, foi considerada a localização da célula de interesse (encosta ou canal) e a complexidade do deslocamento do escoamento superficial em cada uma das células pertencentes à bacia hidrográfica. A soma dos hidrogramas de escoamento superficial foi realizada a partir da soma da vazão produzida na célula de interesse com as vazões advindas das células de contribuição, sendo estas defasadas de um tempo correspondente ao deslocamento do escoamento superficial do centro de gravidade da célula contribuinte até o centro de gravidade da célula de interesse. Na Figura 2 representa-se esquematicamente, o procedimento utilizado, evidenciando-se que as células B e C contribuem com escoamento para a célula A. O hidrograma na célula A é igual à soma do hidrograma produzido nesta célula com os hidrogramas advindos da célula B e célula C. Antes de somar, entretanto, os hidrogramas das células B e C foram deslocados a fim de representar o hidrograma obtido após o deslocamento da água das células de contribuição para a célula de interesse.

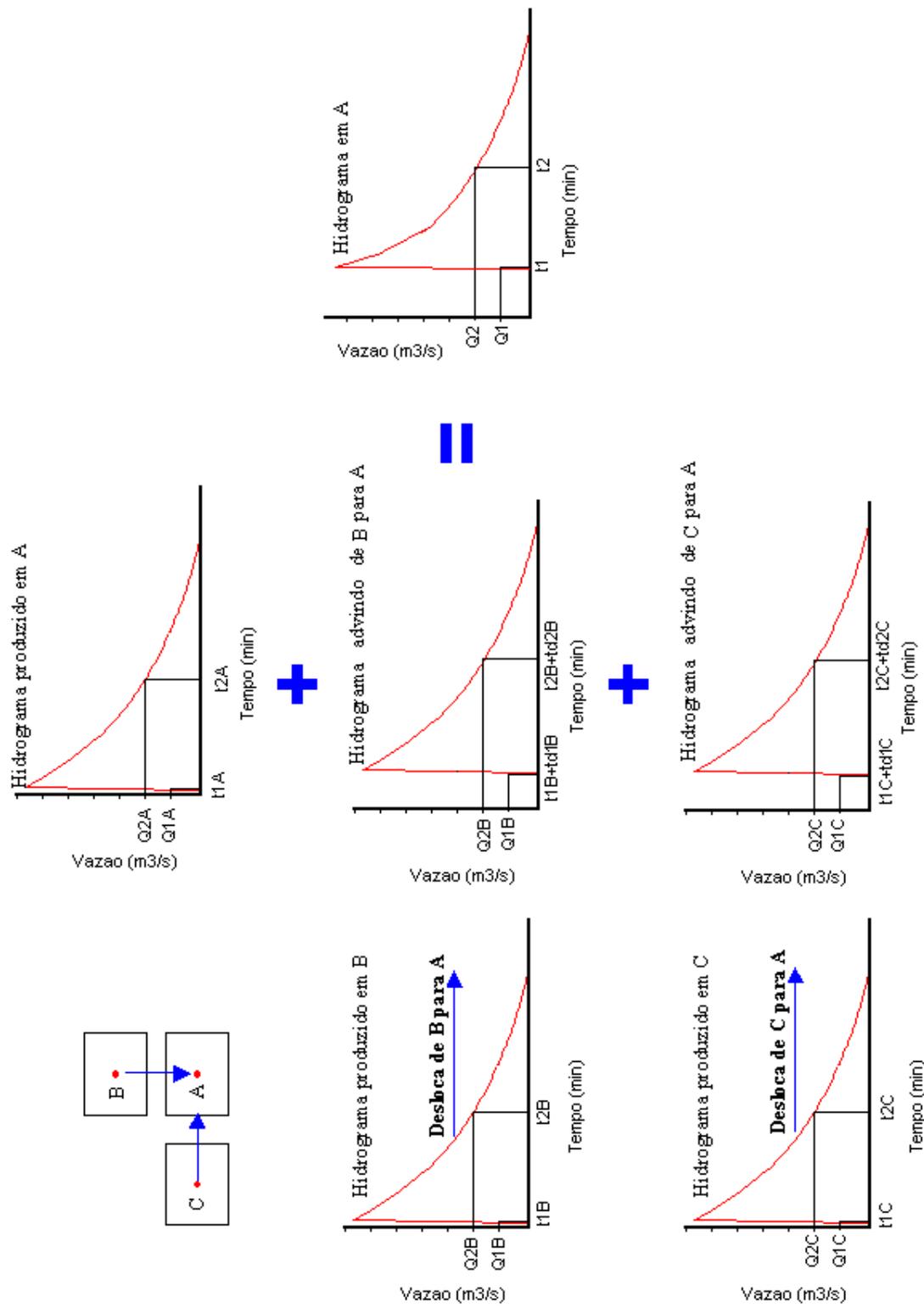


Figura 2 – Representação e esquemática da metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em uma célula

### 3.2.1 Hidrograma de escoamento superficial produzido na célula de interesse

A obtenção do hidrograma de escoamento superficial produzido no centro célula de interesse foi realizada a partir do método proposto por PRUSKI et al. (1999), sendo o balanço hídrico para cada célula feito com base na análise dos componentes representados na Figura 3 e utilizando o procedimento descrito na seqüência.

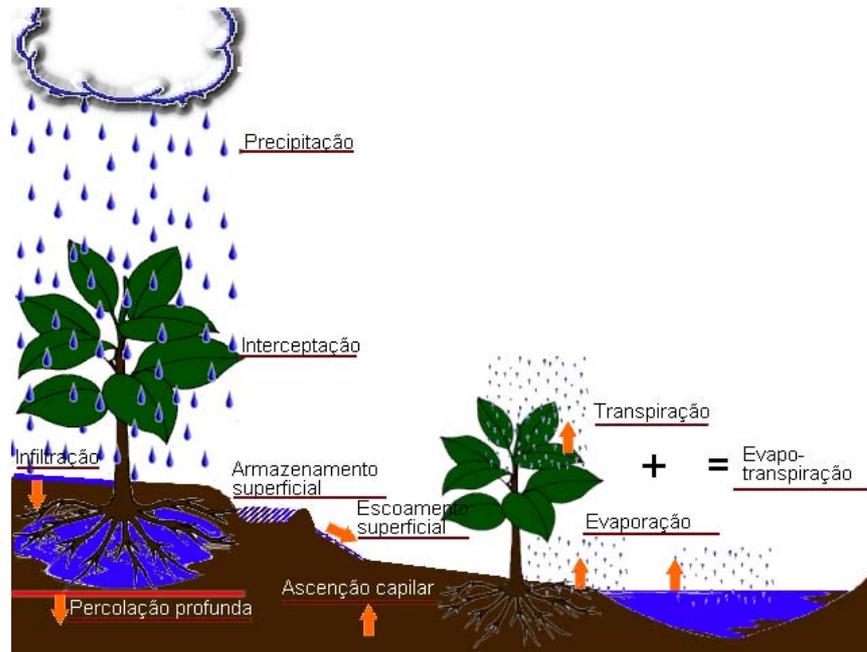


Figura 3 - Representação do balanço hídrico.

Com o início da precipitação começa, simultaneamente, a interceptação pela cobertura vegetal, que representa a fração da precipitação retida pela cobertura vegetal e que, portanto, não atingirá a superfície do solo.

Toda a precipitação é interceptada pela cobertura vegetal até o momento em que o total precipitado se iguala à lâmina de interceptação potencial, sendo a duração da interceptação pela cobertura vegetal calculada resolvendo a equação

$$\int_0^{t_{(ICV)}} i_i dt = ICV \quad (1)$$

em que

ICV = interceptação pela cobertura vegetal, mm;

$i_i$  = intensidade instantânea de precipitação,  $\text{mm h}^{-1}$ ; e  
 $t_{(icv)}$  = tempo de duração da interceptação pela cobertura vegetal, min.

A intensidade de precipitação instantânea é obtida com a equação

$$i_i = i_m \left(1 - \frac{c t}{t + b}\right) \quad (2)$$

sendo

$$i_m = \frac{K T^a}{(t + b)^c} \quad (3)$$

em que

$i_m$  = intensidade máxima média de precipitação,  $\text{mm h}^{-1}$ ;  
 $T$  = período de retorno, anos;  
 $t$  = duração da precipitação, min; e  
 $K, a, b, c$  = parâmetros da equação de chuvas intensas relacionados com a localidade de interesse.

A partir do momento em que toda a lâmina potencialmente interceptável pela cobertura vegetal é preenchida, a lâmina precipitada passa a ser transformada em infiltração e, a partir deste momento, tem-se que a velocidade de infiltração se iguala à intensidade instantânea de precipitação. Esta condição é mantida até que  $i_i$  supere a velocidade de infiltração da água no solo, que é expressa pela equação de Green-Ampt modificada por Mein-Larson (GAML)

$$VI = K_s \left(1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) S_w}{I}\right) \quad (4)$$

em que

$VI$  = velocidade de infiltração da água no solo,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

- $K_s$  = condutividade hidráulica do solo saturado,  $\text{mm h}^{-1}$ ;  
 $\theta_s$  = umidade de saturação do solo,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  
 $\theta_i$  = umidade inicial do solo,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  
 $S_w$  = potencial matricial do solo, mm.c.a.; e  
 $I$  = infiltração acumulada, mm.

A infiltração acumulada, que ocorre do momento que cessa a interceptação até o início do empoçamento de água sobre a superfície do solo, pode ser estimada pela equação:

$$I = \int_{t_{(ICV)}}^{t_{i(ARM)}} i_i dt \quad (5)$$

em que  $t_{i(ARM)}$  é o tempo de início de ocorrência da fase de armazenamento superficial, ou seja, tempo de início do empoçamento de água sobre a superfície do solo, min.

No tempo  $t_{i(ARM)}$  tem-se o início do empoçamento da água sobre a superfície do solo, e a velocidade de infiltração é expressa pela equação de GAML. Portanto, o armazenamento (empocamento) de água sobre a superfície do terreno somente começa a partir do momento em que a intensidade instantânea de precipitação supera a velocidade de infiltração da água no solo. A capacidade (lâmina máxima) de armazenamento superficial da água sobre a superfície do solo terá que ser fornecida pelo projetista.

O tempo para o qual toda a capacidade de armazenamento de água sobre a superfície do solo é preenchida  $t_{(PRE)}$  é calculado pela equação

$$ARM = \int_{t_{i(ARM)}}^{t_{PRE}} i_i dt - \int_{t_{i(ARM)}}^{t_{PRE}} VI dt \quad (6)$$

em que  $t_{(PRE)}$  é o tempo para o qual a capacidade de armazenamento de água sobre a superfície do solo encontra-se preenchida, min.

Após o final da fase de armazenamento superficial começa a acontecer o escoamento superficial, sendo que, para cada tempo  $t$ , sua taxa de ocorrência é

$$q_{ES} = i_i - VI \quad (7)$$

em que  $q_{ES}$  é a taxa de ocorrência do escoamento superficial produzida na célula de interesse,  $mm\ h^{-1}$ .

A velocidade de infiltração da água no solo durante o período em que ocorre o escoamento superficial continua a se processar numa magnitude igual à expressa pela equação GAML até o momento  $t_{f(ES)}$  em que  $i_i = VI$ . Este tempo é obtido pela equação

$$\frac{K T^a}{(t_{f(ES)} + b)^c} \left( 1 - \frac{c t_{f(ES)}}{t_{f(ES)} + b} \right) = K_s \left( 1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) S_w}{I} \right) \quad (8)$$

em que  $t_{f(ES)}$  é o tempo para o qual cessa o escoamento superficial, min.

A vazão de escoamento produzida na célula de interesse é obtida multiplicando a taxa de escoamento obtida pela área da célula, sendo expressa, portanto, pela equação:

$$Q_{célula} = \frac{q_{ES} A}{3,6 \cdot 10^4} \quad (9)$$

em que

$Q_{célula}$  = vazão de escoamento produzida na célula,  $m^3\ s^{-1}$ ; e

$A$  = área da célula,  $m^2$ .

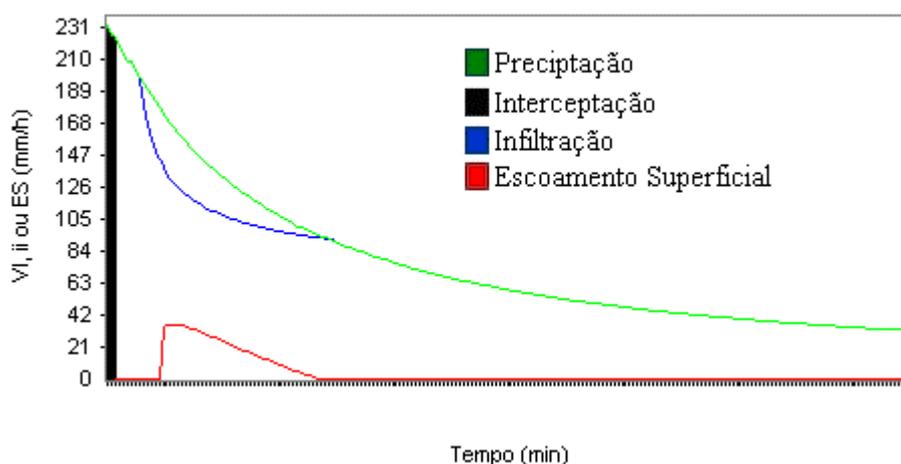


Figura 4 – Representação esquemática do comportamento dos componentes associados ao balanço hídrico para um solo não saturado, obtidos utilizando a metodologia proposta.

### 3.2.2 Hidrograma de escoamento superficial advindo das células que contribuem com escoamento para a célula de interesse

Para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial advindo das células que contribuem com escoamento para a célula de interesse, seguiu-se diferentes metodologias, conforme a célula de interesse estivesse localizada na encosta ou canal. Essa diferenciação deve-se ao fato de que o deslocamento do escoamento superficial na encosta difere do deslocamento do escoamento superficial no canal.

Para obter o hidrograma de escoamento superficial das células que contribuem com escoamento para a célula de interesse localizada na encosta utilizou-se o procedimento:

- identificou-se as células que contribuem com escoamento para a célula de interesse;
- calculou-se os hidrogramas produzidos em cada uma das células contribuintes aplicando o procedimento 3.2.1;
- somou-se os hidrogramas advindos das células contribuintes levando em consideração o deslocamento do escoamento sobre a superfície do terreno.

Para obter o hidrograma de escoamento superficial das células que contribuem com escoamento para a célula de interesse quando estas estão localizadas no canal, utilizou-se o procedimento:

- identificou-se as células da encosta que contribuem com escoamento para a célula de interesse;
- identificou-se as células localizadas ao longo do canal que contribuem com escoamento para a célula de interesse;
- calculou-se os hidrogramas produzidos em cada uma das células contribuintes aplicando o procedimento 3.2.1;
- deslocou-se os hidrogramas produzidos nas células contribuintes até a célula de interesse levando em consideração a localização das células identificadas e o tempo necessário para o deslocamento do escoamento ao longo do canal; e
- somou-se os hidrogramas advindos das células contribuintes localizadas na encosta com as células contribuintes localizadas no canal, levando em consideração o tempo de deslocamento do escoamento superficial na encosta ou no canal.

### **3.2.2.1. Hidrograma de escoamento superficial das células contribuintes localizadas na encosta**

A metodologia utilizada para identificação das células contribuintes localizadas na encosta está baseada em estudos realizados sobre escoamento superficial que têm considerado apenas a declividade do terreno para a definição da direção do escoamento superficial (BEVEN e KIRKBY, 1979; MOORE e BURCH, 1986; 1994; MEROT et al., 1995; JULIEN, 1995). Dessa maneira, essa identificação foi feita com base na cota das quatro células vizinhas, sendo que uma célula só irá contribuir com escoamento para outra célula vizinha caso esta tenha cota menor que a dela. Na Figura 5 as setas indicam a direção e o sentido das contribuições e mostram que uma célula poderá contribuir para, no máximo, quatro células (ex: um ponto muito elevado) e, no mínimo, para nenhuma célula (ex: um canal ou um rio).

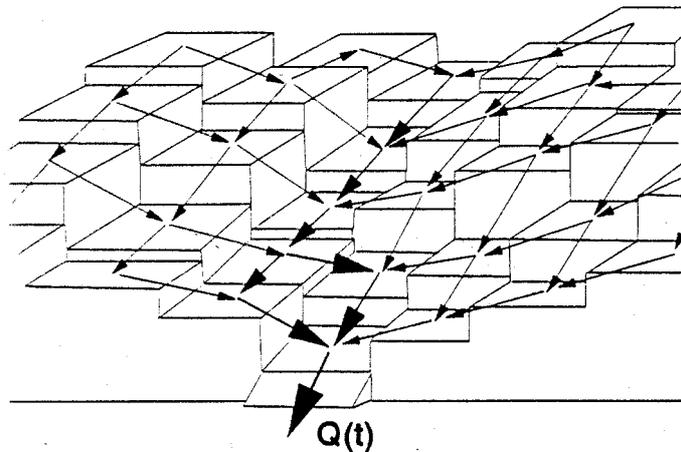


Figura 5 – Representação do estabelecimento de direção do escoamento superficial  
 Fonte: JULIEN, 1995.

Observa-se pela Figura 5 que foi considerado, na metodologia de identificação das células contribuintes, apenas as quatro células vizinhas (à direita, à esquerda, acima e abaixo) desprezando-se, portanto, as células vizinhas à diagonal. Justifica-se este fato porque a área de contato entre as células vizinhas à diagonal e a célula de interesse é muito pequena e, conseqüentemente, a vazão proveniente dessas células até a célula de interesse desprezível.

Geralmente uma célula não contribui com todo seu escoamento para outra célula (Figura 6), uma vez que parte do escoamento produzido em uma célula pode escoar para uma célula vizinha e parte para outra célula vizinha. Sendo assim, calculou-se os fatores de contribuição, correspondentes à contribuição advinda de uma célula para as outras pelas equações

$$F_x = \frac{A_1}{(A_1 + A_2)} \quad (10)$$

$$F_y = \frac{A_2}{(A_1 + A_2)} \quad (11)$$

em que

$F_x$  = fator de contribuição que representa a componente do escoamento associado à direção x, %;

$F_y$  = fator de contribuição que representa a componente do escoamento associado à direção y, %; e

$A_1$  e  $A_2$  = áreas de contribuição.

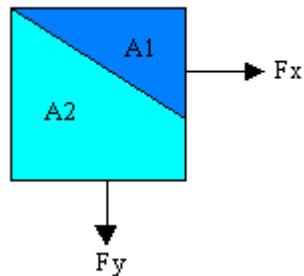


Figura 6 – Geometria do escoamento superficial em uma célula.

O hidrograma de escoamento superficial advindo das células contribuintes localizadas na encosta foi calculado pela equação

$$Q_{ce} = \sum F_{x \text{ ou } y} Q_{célula} [i \pm 1, j \pm 1, t + t_d] \quad (12)$$

em que

$Q_{ce}$  = vazão que contribui com escoamento para a célula de interesse localizada na encosta,  $m^3 s^{-1}$ ;

$Q_{célula} [i \pm 1, j \pm 1, t + t_d]$  = vazão de escoamento sobre a superfície do terreno apresentada pelas células que contribuem com escoamento para a célula de interesse, para um tempo  $t + t_d$ ,  $m^3 s^{-1}$ ; e

$t_d$  = tempo de deslocamento do escoamento superficial na encosta,

min.

O cálculo do tempo correspondente ao deslocamento da água sobre a superfície da encosta foi obtido pela equação

$$t_d[i, j, t] = \frac{n_t \text{ dim}}{S_t^{1/2} y[i \pm 1, j \pm 1, t]^{2/3} 60} \quad (13)$$

em que

- $t_d[i, j, t]$  = tempo de deslocamento do escoamento superficial na encosta, min;
- $n_t$  = coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning para a superfície da encosta,  $s \text{ m}^{-1/3}$ ;
- $\text{dim}$  = dimensão da célula, m;
- $S_t$  = declividade da encosta,  $\text{m m}^{-1}$ ; e
- $y[i \pm 1, j \pm 1, t]$  = lâmina de escoamento superficial sobre a superfície da encosta no tempo  $t$ , m.

O valor de  $y[i \pm 1, j \pm 1, t]$  foi obtido pela equação

$$y[i \pm 1, j \pm 1, t] = \left( \frac{Q_{\text{célula}}[i \pm 1, j \pm 1, t] n_t}{S_t^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (14)$$

Calculou-se o tempo de deslocamento utilizando a equação de Manning. O emprego da equação de Manning é justificável, neste caso, em virtude do fato de que a solução foi aplicada a pequenos segmentos da bacia (células), ao longo dos quais o uso de uma equação baseada em condições permanentes e uniformes (como é o caso da equação de Manning) não se distancia muito da realidade.

### 3.2.2.2. Hidrograma de escoamento superficial das células contribuintes localizadas no canal

A identificação das células contribuintes localizadas no canal (Figura 7) foi feita seguindo as etapas:

- aplicou-se a metodologia descrita no item 3.2.2.1, identificando-se assim as células que contribuem com escoamento superficial para a célula de interesse; e
- comparou-se as células identificadas como contribuintes com as células pertencentes à uma imagem raster representando a hidrografia da bacia onde as células localizadas no canal são as que possuem atributo z diferente de zero.

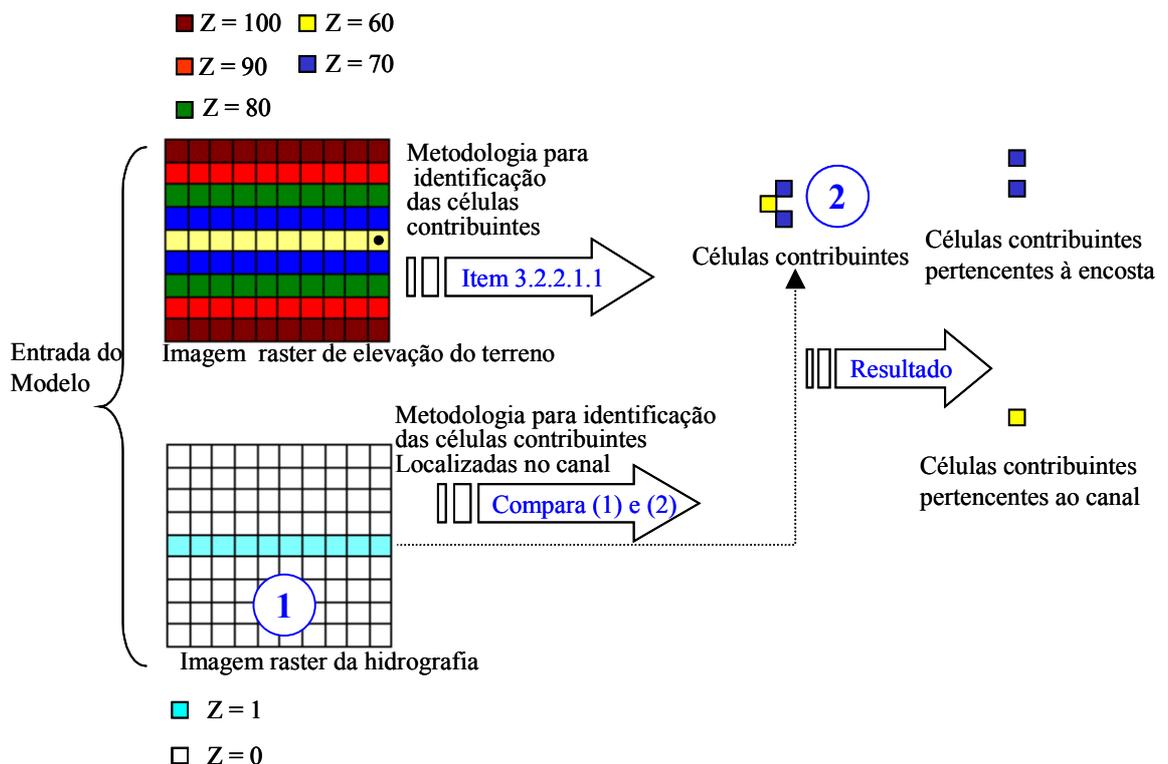


Figura 7 – Representação da metodologia para identificar as células de contribuição localizada em um canal.

Observa-se pela Figura 7 que a metodologia representada depende da imagem raster da hidrografia da bacia, o que restringe o uso do modelo. O ideal seria identificar os canais naturais pertencentes à bacia utilizando apenas a imagem de elevação.

O hidrograma de escoamento superficial advindo das células contribuintes localizadas no canal foi calculado pela equação

$$Q_{cc} = \sum Q_{célula}[i \pm 1, j \pm 1, t + t_{dcan}] \quad (15)$$

em que

$Q_{cc}$  = vazão que contribui com escoamento para a célula de interesse localizada no canal,  $m^3 s^{-1}$ ;

$Q_{célula}[i \pm 1, j \pm 1, t + t_{dcan}]$  = vazão de escoamento sobre a superfície do canal, apresentada pelas células que contribuem com escoamento para a célula de interesse, para um tempo  $t + t_{dcan}$ ,  $m^3 s^{-1}$ ; e

$t_{dcan}$  = tempo de deslocamento do escoamento superficial no canal, min;.

O cálculo do tempo correspondente ao deslocamento da água no canal foi obtido pela equação

$$t_{dcan}[j, t] = \frac{L_c n_c (2S_t S_m (\sin(aa) + \sin(bb)))^{2/3}}{S_c^{1/2} (Y_{can}[i \pm 1, j \pm 1, t] (S_t + S_m)) \sin(aa) \sin(bb)^{2/3} 60 \text{col}} \quad (16)$$

em que

$L_c$  = comprimento do canal, m;

$n_c$  = coeficiente de rugosidade de Manning para o canal,  $s m^{-1/3}$ ;

$S_m$  = declividade da parede de montante do canal =  $\text{tg}(aa)$ ,  $m m^{-1}$ ;

$aa$  = inclinação da parede de montante do canal, graus;

$bb$  = inclinação do terreno, graus;

$S_c$  = declividade do canal,  $m\ m^{-1}$ ;

$Y_{can}$  = altura da lâmina d'água na seção do canal, m; e

col = número de colunas.

O valor de  $Y_{can}[i \pm 1, j \pm 1, t]$  foi obtido pela equação

$$Y_{can}[i \pm 1, j \pm 1, t] = \left( \frac{Q_{cc} t[i \pm 1, j, t] n_s}{S_t^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (17)$$

A metodologia só é válida para canais de seção transversal com formato triangular (Figura 8).

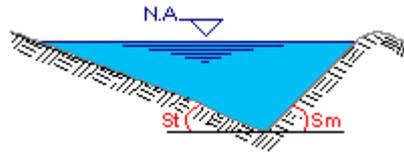


Figura 8 – Representação esquemática da seção transversal do canal com formato triangular.

### 3.3. Hidrograma de escoamento superficial na encosta

O hidrograma de escoamento superficial na célula de interesse localizada na encosta é a soma do hidrograma advindo das células localizadas na encosta com o hidrograma produzido na própria célula e foi calculado pela equação

$$Q_e[i,j,t] = Q_{ce} + Q_{célula} \quad (18)$$

em que  $Q_e[i,j,t]$  é a vazão de escoamento sobre a superfície do terreno apresentada pela célula  $[i,j]$  para um tempo igual a  $t$ ,  $m^3\ s^{-1}$ .

### 3.4. Hidrograma de escoamento superficial no canal

O hidrograma de escoamento superficial em uma célula localizada no canal é a soma do hidrograma advindo das células contribuintes localizadas no

canal com o hidrograma advindo das células contribuintes localizadas na encosta e com o hidrograma produzido na própria célula sendo calculado pela equação

$$Q_c[i,j,t] = Q_{cc} + Q_{ce} + Q_{célula} \quad (19)$$

em que  $Q_c[i,j,t]$  é a vazão de escoamento sobre o canal apresentada pela célula  $[i,j]$  para um tempo igual a  $t$ ,  $m^3 s^{-1}$ ;

### 3.5. Volume de escoamento superficial

Em um hidrograma o volume de escoamento superficial corresponde à área sob a curva representativa da vazão em função do tempo. Para obtenção da área, procedeu-se à integração do hidrograma, utilizando para tanto a regra dos trapézios, que consiste no somatório das áreas de retângulos construídos sob a curva do hidrograma.

### 3.6 Desenvolvimento do software

O software desenvolvido é um aperfeiçoamento do software HIDROGRAMA 1.0 (SILVA, 1999), que permite obter o hidrograma de escoamento superficial em qualquer posição de uma encosta regular (declividade constante), para solos com umidade próxima à saturação (condição extrema de ocorrência do escoamento superficial) e para seções transversais de canais de terraços ou drenos de superfície. Com o aperfeiçoamento do software pode-se encontrar o hidrograma de escoamento superficial em qualquer posição de uma bacia hidrográfica (declividade variada) podendo a umidade do solo ser qualquer. Além destes aperfeiçoamentos promoveu-se também a substituição do componente relativo às abstrações iniciais (correspondente a toda a precipitação que antecede o início do escoamento superficial) pelos processos de interceptação pela cobertura vegetal e armazenamento superficial descrito no item 3.2.1.

O software foi desenvolvido em ambiente de programação Delphi 5.0, que utiliza a linguagem Pascal orientada à objeto.

A Figura 9 representa o fluxograma do software, na seqüência procede-se a descrição de seus componentes.

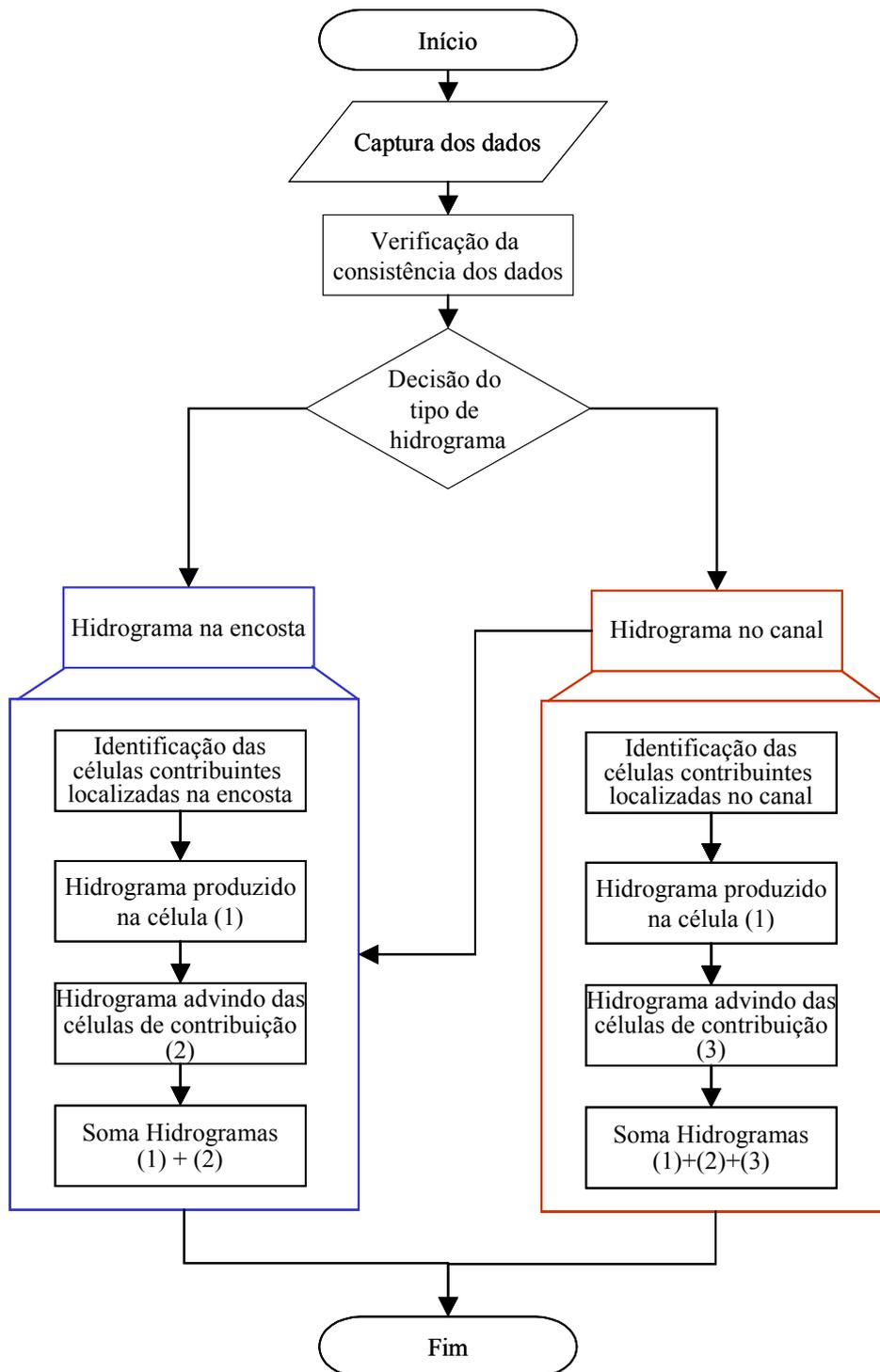


Figura 9 – Fluxograma de funcionamento do software.

### 3.6.1. Captura dos dados

Nesta etapa o software captura os dados necessários para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial, correspondentes aos parâmetros da equação de chuvas intensas, mapa de elevação da bacia hidrográfica, mapa da hidrografia da bacia, interceptação pela cobertura vegetal, armazenamento superficial, parâmetros referentes ao solo (umidade inicial, umidade de saturação, condutividade hidráulica do solo saturado e potencial matricial na frente de umedecimento), rugosidade hidráulica do terreno e do canal, declividade da parede de montante do canal, declividade do canal, coordenadas (linha e coluna) da célula na qual se deseja traçar o hidrograma e o tipo de hidrograma desejado (hidrograma na encosta ou canal).

Os dados de precipitação são capturados através de um submódulo pertence ao software Plúvio 1.0, desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Neste submódulo é possível capturar informações relativas aos parâmetros da equação de chuvas intensas ( $K$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) a partir de um banco de dados onde a relação entre intensidade, duração e frequência da precipitação é conhecida para os Estados de Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo ou a partir de valores fornecidos pelo usuário do sistema.

Os dados de elevação e hidrografia são capturados através de uma imagem raster representativa das cotas e da hidrografia da bacia, respectivamente.

Os dados de interceptação, armazenamento, solo e rugosidade podem ser capturados através de imagens que contenham a variação espacial dos mesmos ou através de um único valor, representando seus valores médios ao longo da bacia.

Os dados de declividade da parede de montante do canal e declividade do canal são obtidos através de valores únicos fornecidos pelo usuário do sistema.

### **3.6.2. Verificação da consistência dos dados**

O software faz a verificação da consistência de todos os dados capturados seguindo as condições:

- os dados fornecidos deverão ser números reais e positivos;
- o valor da umidade inicial deverá ser menor do que o valor da umidade de saturação;
- as imagens fornecidas deverão estar no formato raster e representar a mesma bacia; e
- os atributos da imagem deverão ser reais e positivos

Caso uma dessas condições não sejam satisfeitas, o software enviará uma mensagem indicando o erro e interromperá o processo de execução.

### **3.6.3. Decisão do tipo de hidrograma**

O software segue metodologias específicas, conforme o interesse seja o traçado do hidrograma na ou no canal. O dado de entrada utilizado para a tomada de decisão é o tipo de hidrograma escolhido pelo usuário do sistema.

### **3.6.4. Identificação das células contribuintes localizadas na encosta**

O software identifica quais as células pertencentes à bacia contribuem com escoamento superficial para a célula de interesse (localizada na encosta) seguindo procedimento descrito do item 3.2.2.1. Os dados de entrada utilizados nesta etapa são a imagem de elevação da bacia e as coordenadas da célula de interesse.

### **3.6.5. Cálculo do hidrograma na encosta**

A partir dessa etapa o software trabalha apenas com as células identificadas e calcula para cada uma delas, iniciando da célula mais remota e terminando na célula de interesse, o hidrograma de escoamento superficial seguindo os procedimentos:

- cálculo do hidrograma produzido na célula considerada seguindo a metodologia descrita no item 3.2.1 utilizando os dados de entrada referentes aos parâmetros da equação de chuvas intensas ( $K$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $T$ ), parâmetros do solo ( $\theta_s$ ,  $\theta_i$ ,  $S_w$ ,  $K_s$ ), interceptação pela cobertura vegetal e armazenamento superficial;
- cálculo do hidrograma advindo das células contribuintes localizadas na encosta, seguindo a metodologia descrita no item 3.2.2 e utilizando como dado de entrada adicional o coeficiente de rugosidade do terreno ( $n_t$ ); e
- soma dos hidrogramas produzidos na célula considerada com os hidrogramas advindos das células contribuintes, utilizando a metodologia descrita no item 3.3.

#### **3.6.6. Identificação das células contribuintes localizadas no canal**

O software identifica quais células pertencentes à bacia contribuem com escoamento superficial para a célula de interesse localizada no canal seguindo procedimento descrito no item 3.2.2.2. Os dados de entrada utilizados nesta etapa são a imagem de elevação da bacia, a imagem representando a hidrografia da bacia as e coordenadas da célula de interesse para o traçado do hidrograma.

#### **3.6.7. Cálculo do hidrograma no canal**

A partir dessa etapa o software trabalha apenas com as células identificadas e calcula para cada uma delas, iniciando da célula mais remota e terminando na célula de interesse, o hidrograma de escoamento superficial seguindo os procedimentos:

- cálculo do hidrograma produzido na célula considerada seguindo a metodologia descrita no item 3.2.1 utilizando os dados de entrada referentes aos parâmetros da equação de chuvas intensas ( $K$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $T$ ) parâmetros do solo ( $\theta_s$ ,  $\theta_i$ ,  $S_w$ ,  $K_s$ ), interceptação pela cobertura vegetal e armazenamento superficial;

- cálculo do hidrograma advindo das células contribuintes localizadas no canal e na encosta, seguindo a metodologia descrita no item 3.2.2 e utilizando como dados de entrada adicionais o coeficiente de rugosidade do terreno ( $n_t$ ) e canal ( $n_c$ ), declividade da parede de montante do canal ( $S_m$ ) e declividade do canal ( $S_c$ );
- soma dos hidrogramas produzidos na célula considerada com os hidrogramas advindos das células de contribuição, seguindo a metodologia descrita no item 3.4.

### **3.7. Análise do comportamento do modelo para diferentes condições do canal e da bacia**

Para a análise do comportamento e sensibilidade do modelo procedeu-se a obtenção do hidrograma de escoamento superficial em diferentes condições da encosta e canal. As simulações foram feitas, inicialmente, para uma encosta regular (com declividade constante) e, posteriormente, para uma encosta irregular (com declividade variada), comparou-se os resultados obtidos nas simulações com os resultados obtidos por outros modelos (HIDROGRAMA 1.0 ou Método Racional) e com aqueles encontrados para uma condição considerada inicial.

#### **3.7.1. Encosta regular**

Os fatores utilizados para as condições iniciais da encosta regular (Figura 10) são hipotéticos e foram os seguintes:

- Parâmetros da equação de chuvas intensas para a região de Viçosa – MG (PINTO, 1995):
  - $K = 1082,80$ ;
  - $a = 0,2650$ ;
  - $b = 23,7810$ ;
  - $c = 0,7750$ ; e
  - $T = 10$  anos.
- Encosta:
  - comprimento ( $L_e$ ): 50 m;

- declividade ( $S_t$ ):  $0,1 \text{ m m}^{-1}$ ;
- armazenamento superficial (ARM): não foi considerado;
- interceptação pela cobertura vegetal (ICV): não foi considerada;
- umidade inicial ( $\theta_i$ ):  $0,4999 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;
- umidade de saturação ( $\theta_s$ ):  $0,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;
- condutividade hidráulica ( $K_s$ ):  $30 \text{ mm h}^{-1}$ ;
- potencial matricial ( $S_w$ ):  $0,1 \text{ mm.c.a}$
- rugosidade do terreno ( $n_t$ ):  $0,12 \text{ s m}^{-1/3}$ ;
- Canal:
  - Comprimento ( $L_c$ ):  $400 \text{ m}$ ;
  - declividade ( $S_c$ ):  $0,001 \text{ m m}^{-1}$ ;
  - coeficiente de rugosidade ( $n_c$ ):  $0,025$ ; e
  - declividade da parede de montante ( $S_m$ ):  $1 \text{ m m}^{-1}$ .

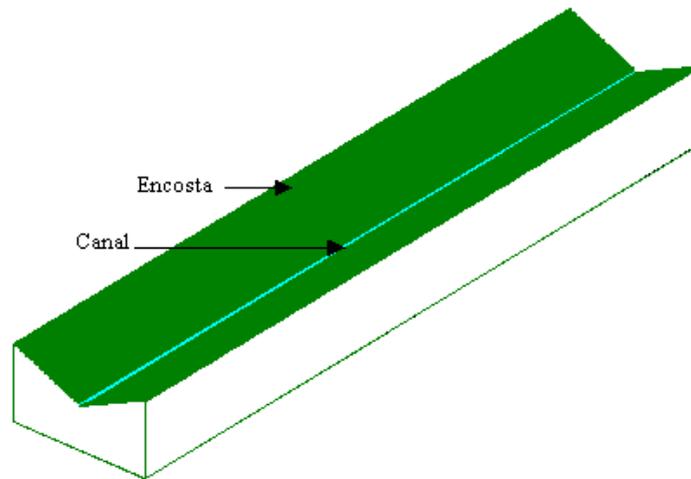


Figura 10 – Representação tridimensional da encosta em estudo.

O modelo digital de elevação representando a encosta em estudo possui tamanho de célula de  $1 \text{ m}$  e está representado na Figura 11.



Figura 11 – Representação do modelo digital de elevação da encosta.

As simulações foram realizadas considerando a variação de um dos fatores, com os demais sendo mantidos constantes e iguais às condições iniciais.

Para essas simulações, adotou-se as variações de cada fator, citadas a seguir:

- comprimento da encosta: 10 e 30 m;
- comprimento do canal: 500 e 300 metros;
- período de retorno: 5 e 20 anos;
- interceptação pela cobertura vegetal: 0,76 e 1,5 mm;
- armazenamento superficial: 1,5 e 3 mm;
- condutividade hidráulica: 50 e 70 mm h<sup>-1</sup>;
- umidade inicial: 0,45 e 0,40 mm;
- potencial matricial: 100 e 150 mm.c.a;
- rugosidade do terreno: 0,04 e 0,25 s m<sup>-1/3</sup>;
- rugosidade do canal: 0,005 e 0,10 s m<sup>-1/3</sup>;
- declividade do canal: 0,0005 e 0,002 m m<sup>-1</sup>.

As diferenças percentuais entre a vazão máxima e volume de escoamento superficial obtidos para cada uma das simulações e para a condição inicial foram calculadas pelas equações

$$\Delta Q_I = \left( \frac{Q_M - Q_I}{Q_I} \right) 100 \quad (20)$$

em que

- $\Delta Q_I =$  diferença percentual entre a vazão máxima obtida para uma das simulações em relação à condição inicial, %;
- $Q_M =$  vazão máxima de escoamento superficial obtida para uma das simulações do modelo,  $L s^{-1}$ ; e
- $Q_I =$  vazão máxima de escoamento superficial obtida para a condição inicial.

$$\Delta V_I = \left( \frac{V_M - V_I}{V_I} \right) 100 \quad (21)$$

em que

- $\Delta V_I =$  diferença percentual entre os volumes obtidos para uma das simulações em relação à condição inicial, %;
- $V_M =$  volume de escoamento superficial obtido para uma das simulações do modelo, L; e
- $V_I =$  volume de escoamento superficial obtido para a condição inicial, L;

As simulações foram realizadas considerando o solo com umidade inicial próxima à saturação, a fim de comparar os resultados de vazão máxima e volume total escoado com valores obtidos pelo software HIDROGRAMA 1.0. As diferenças percentuais entre esses resultados foram obtidas pelas equações

$$\Delta Q_H = \left( \frac{Q_M - Q_H}{Q_H} \right) 100 \quad (22)$$

em que

- $\Delta Q_H =$  diferença percentual entre as vazões máximas obtidas pelo modelo proposto e HIDROGRAMA 1.0, %;
- $Q_M =$  vazão máxima de escoamento superficial obtida pelo modelo

proposto,  $L s^{-1}$ ;  
 $Q_H =$  vazão máxima de escoamento superficial obtida pelo  
 HIDROGRAMA 1.0,  $L s^{-1}$ ;

$$\Delta V_H = \left( \frac{V_M - V_H}{V_H} \right) 100 \quad (23)$$

em que

$\Delta V_H =$  diferença percentual entre as volumes obtidos pelo  
 modelo proposto e HIDROGRAMA 1.0, %;

$V_M =$  Volume de escoamento superficial obtido pelo modelo, L; e

$V_H =$  Volume de escoamento superficial obtido pelo Hidrograma  
 1.0, L;

### 3.7.2. Encosta irregular

A encosta em estudo pertence à bacia hidrográfica do Rio Paraobeba. Os fatores utilizados para a condição considerada inicial nessa encosta foram:

Parâmetros da equação das chuvas intensas para a região de Juatuba – MG:

- $K = 1937,99$ ;
- $a = 0,239$ ;
- $b = 22,584$ ;
- $c = 0,871$ ; e
- $T = 10$  anos.
- Encosta:
  - comprimento: 150 m;
  - armazenamento superficial: não foi considerado;
  - interceptação pela cobertura vegetal: não foi considerado;
  - umidade inicial:  $0,4999 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;

- umidade de saturação:  $0,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;
- condutividade hidráulica:  $30 \text{ mm h}^{-1}$ ;
- potencial matricial:  $0,1 \text{ mm.c.a}$ ;
- rugosidade do terreno:  $0,12 \text{ s m}^{-1/3}$ ;

O modelo digital de elevação representando a encosta em estudo possui tamanho de célula de 30 m, área de contribuição de  $750 \text{ m}^2$  e está representado na Figura 12;

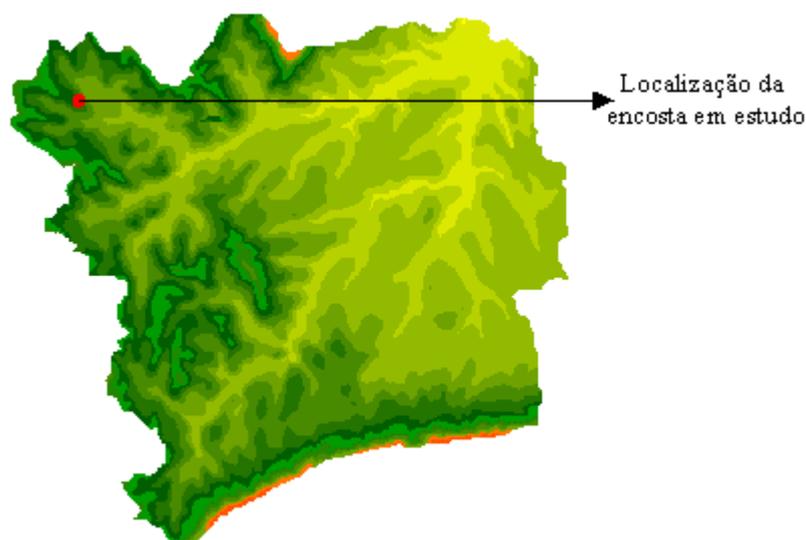


Figura 12 – Representação do modelo digital de elevação da bacia em estudo.

As simulações foram realizadas considerando a variação de um dos fatores com os demais mantidos constantes e iguais às condições iniciais. Para essas simulações, adotou-se as variações de cada fator, citadas a seguir:

- comprimento da encosta ( $L_e$ ): 120 e 60 m;
- período de retorno (T): 5 e 20 anos;
- interceptação pela cobertura vegetal (ICV): 0,76 e 1,5 mm;
- armazenamento superficial: 1,5 e 3 mm;
- umidade inicial:  $0,45$  e  $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;
- condutividade hidráulica: 5 e  $70 \text{ mm h}^{-1}$ ;
- potencial matricial: 100 e 150 mm.c.a

- rugosidade do terreno: 0,04 e 0,25 s m<sup>-1/3</sup>;
- rugosidade do canal: 0,05 e 0,10 s m<sup>-1/3</sup>; e
- declividade do canal: 0,0005 e 0,002 m m<sup>-1</sup>.

As diferenças percentuais entre a vazão máxima e volume de escoamento superficial obtidos para cada uma das simulações e para a condição inicial foram calculadas pelas Equações 20 e 21.

As simulações foram realizadas considerando o solo com umidade inicial próxima à saturação, a fim de comparar os resultados de vazões máximas obtidas pelo modelo com valores obtidos pelo método racional

$$Q_{\max} = \frac{C_i A_b}{360} \quad (24)$$

em que

$Q_{\max}$  = vazão máxima de escoamento superficial, m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>;

$C$  = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

$i_m$  = intensidade máxima média de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração, mm h<sup>-1</sup>; e

$A_b$  = área da bacia de drenagem, ha.

A intensidade máxima média para uma duração correspondente ao tempo de concentração ( $t_c$ ), e para o período de retorno estabelecido, foi calculada pela equação 3, sendo o  $t_c$  obtido pela equação

$$t_c = 6,92 \frac{(Ln_t)^{0,6}}{im^{0,4} S_s^{0,3}} \quad (25)$$

em que

$t_c$  = tempo de concentração, min;

$L$  = comprimento da bacia, m;

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning, s m<sup>-1/3</sup>; e

$S_s$  = declividade da superfície,  $m m^{-1}$ ;

A equação 25 é baseada no método da onda cinemática, sendo  $t_c$  obtido por processo iterativo, pois para determinar  $i_m$  é necessário conhecer sua duração que é igual ao tempo de concentração.

A diferença percentual entre as vazões máximas obtidas pelo modelo e pelo método racional foi calculada pela equação

$$\Delta Q_R = \left( \frac{Q_M - Q_R}{Q_R} \right) 100 \quad (26)$$

em que

$\Delta Q_R$  = diferença percentual entre as vazões máximas obtidas pelo modelo proposto e método racional, %;

$Q_M$  = vazão máxima de escoamento superficial obtida pelo modelo proposto,  $L s^{-1}$ ;

$Q_H$  = vazão máxima de escoamento superficial obtida pelo método racional,  $L s^{-1}$ ;

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Software desenvolvido**

O software desenvolvido, denominado HIDROBACIA, funciona por meio de três módulos: principal, entrada de dados e resultados.

O módulo principal (Figura 13) permite que o usuário do sistema inicie um novo projeto, abra um projeto já existente, salve ou feche um projeto aberto e finalize a execução do programa.

O módulo entrada de dados permite que o usuário forneça os dados referentes às condições da hidrográfica em que deseja obter o hidrograma de escoamento superficial. O usuário deverá escolher também o tipo de hidrograma a ser calculado (na encosta ou no canal) selecionando a opção na tela de entrada de dados.

Os dados de precipitação (Figura 14) poderão ser fornecidos pela digitação dos valores dos parâmetros da equação de chuvas intensas nos campos correspondentes ou consultando um banco de dados para a obtenção desses parâmetros.

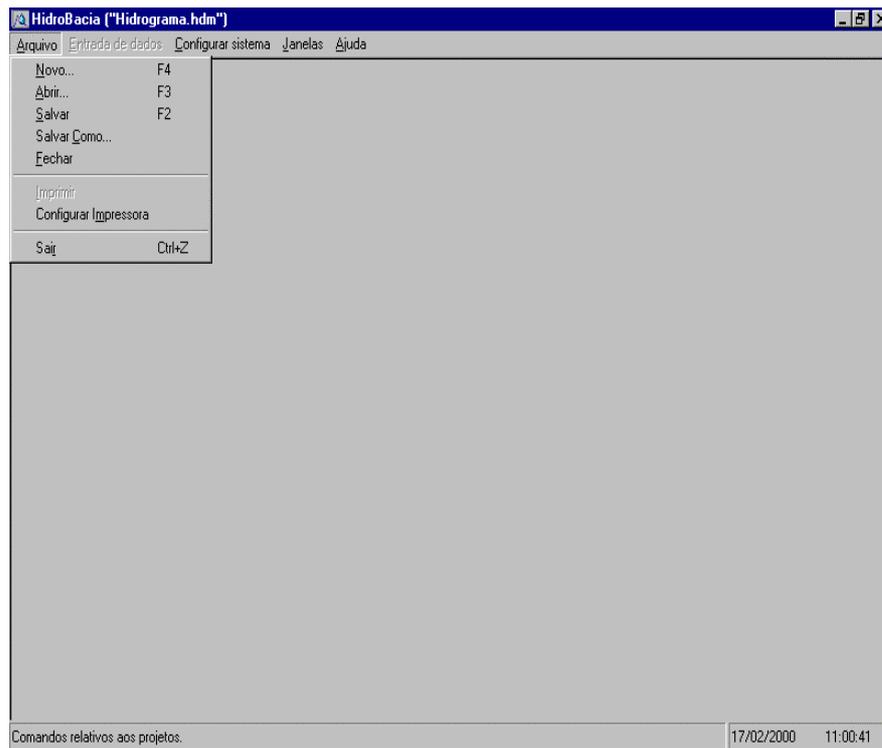


Figura 13 – Tela relativa ao módulo principal.

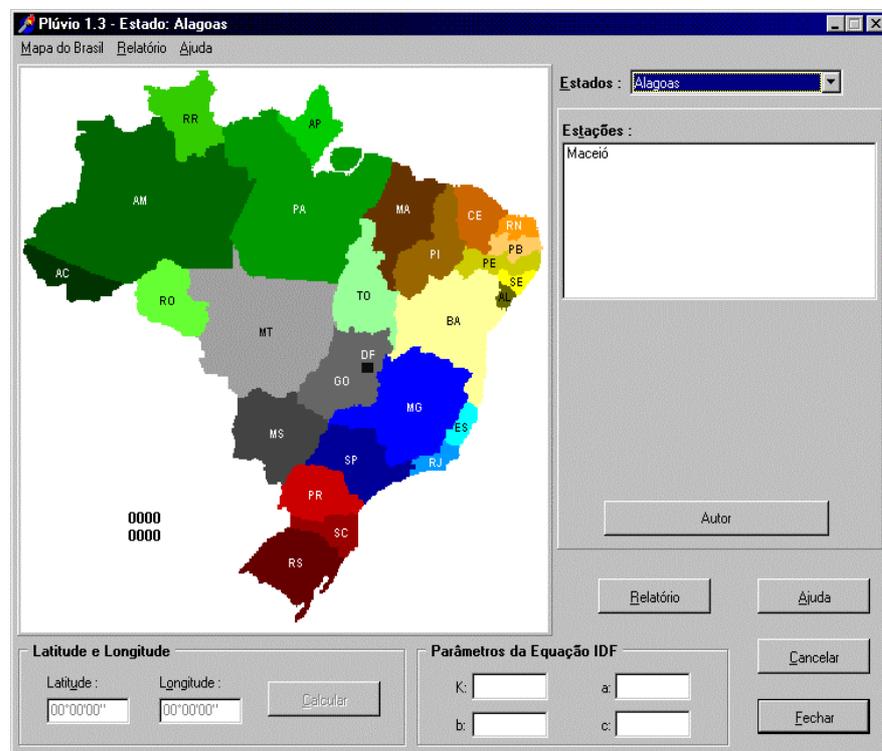


Figura 14 – Tela relativa à obtenção dos parâmetros da equação de chuvas intensas obtida através do programa Plúvio 1.3.

Para os Estados de Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo estão disponíveis bancos de dados que permitem a obtenção da equação de chuvas intensas para qualquer localidade, o que pode ser feito a partir da consulta a uma lista de localidades (distritos e sedes de municípios), obtida junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, ou fornecendo as coordenadas geográficas do local pretendido. Para os outros estados brasileiros existe um banco de dados com parâmetros relativos às localidades em que a equação de chuvas intensas é conhecida. Este procedimento é realizado a partir da consulta ao software PLÚVIO 1.3.

Os dados referentes aos parâmetros da equação de chuvas intensas são transportados para as telas de entrada de dados (Figura 15), sendo também requeridas informações pertinentes a duração da precipitação a ser considerada e do período de retorno, o qual pode também ser estimado pelo modelo. Neste caso é solicitado ao usuário a lâmina precipitada.

Os dados referentes à elevação e à hidrografia da bacia são fornecidos digitando o nome e local das imagens que representam o modelo digital de elevação do terreno e da hidrografia da bacia. O mapa de hidrografia somente será necessário se o local em que se deseja traçar o hidrograma encontra-se no canal.

Os dados referentes à interceptação pela cobertura vegetal, ao armazenamento superficial, à rugosidade do terreno e aos parâmetros do solo (umidade inicial, umidade de saturação, condutividade hidráulica do solo saturado e potencial matricial na frente de umedecimento), são fornecidos digitando seus valores nos campos correspondentes, caso as condições da bacia sejam uniformes, ou digitando o nome e local das imagens, caso as condições da bacia variem espacialmente.

Os dados referentes ao canal (rugosidade, declividade e declividade da parede de montante) são fornecidos nos campos correspondentes, sendo necessários somente se o local em que se deseja obter o hidrograma localizar-se no canal.

(a)

The screenshot shows the 'HidroBacia' software window with the following settings:

- Precipitação:**
  - Equação de chuvas intensas: K: 1082,798, b: 23,7810, a: 0,2650, c: 0,7750
  - Latitude: 20°45'00"
  - Longitude: 42°51'00"
  - Período de retorno:  Fornecer valor 10 anos,  Estimar
  - Duração da precipitação: 10 min
- Elevação:** C:\GPRH - Softwares\Hidrograma 3.0\Simulações\Canal1.ras
- Interceptação (mm):**  Valores variados (C:\Testes\Tese\int1.ras),  Valor médio (0,00)
- Armazenamento (mm):**  Valores variados (C:\Testes\Tese\arm1.ras),  Valor médio (0,00)
- Rugosidade do terreno:**  Valores variados (C:\Testes\Tese\Nt1.ras),  Valor médio (0,12)

Buttons: Consulta, Avançar >>

(b)

The screenshot shows the 'HidroBacia' software window with the following settings:

- Parâmetros do solo:**
  - Umidade de saturação (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>):  Valores variados,  Valor médio (0,5000)
  - Umidade inicial (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>):  Valores variados,  Valor médio (0,4990)
  - Condutividade hidráulica (mm/h):  Valores variados,  Valor médio (30,00)
  - Potencial matricial:  Valores variados,  Valor médio (0,10)
- Características do canal:**
  - Rugosidade: 0,0250
  - Sm: 1,0000 m/m
  - St: 1,0000 m/m
  - Declividade: 0,00100 m/m
  - Tipo de hidrograma:  Encosta,  Canal
- Hidrografia:** C:\GPRH - Softwares\Hidrograma 3.0\Simulações\Hidrog
- Célula de interesse:** Linha: 50, Coluna: 11

Buttons: << Voltar, Hidrograma

Figura 15 – Telas relativas aos dados de entrada. (a) Informações referentes às condições de precipitação, elevação do terreno, interceptação pela cobertura vegetal, armazenamento superficial e rugosidade do terreno; (b) Informações referentes aos parâmetros do solo, as características do canal, à hidrografia da bacia e a posição do traçado do hidrograma.

A posição (célula de interesse) em que se deseja obter o hidrograma será fornecida através da linha i e coluna j referentes às suas coordenadas terrestres.

No módulo resultados (Figura 16) o software exibe o hidrograma no local de interesse e permite ainda salvar os dados de tempo e vazão em um arquivo texto, salvar o hidrograma como “bitmap” padrão do Windows, copiar os dados de tempo e vazão para a área de transferência do Windows, imprimir o hidrograma, visualizar os valores de tempo e vazão e gerar um relatório com os dados de entrada e resultados finais.

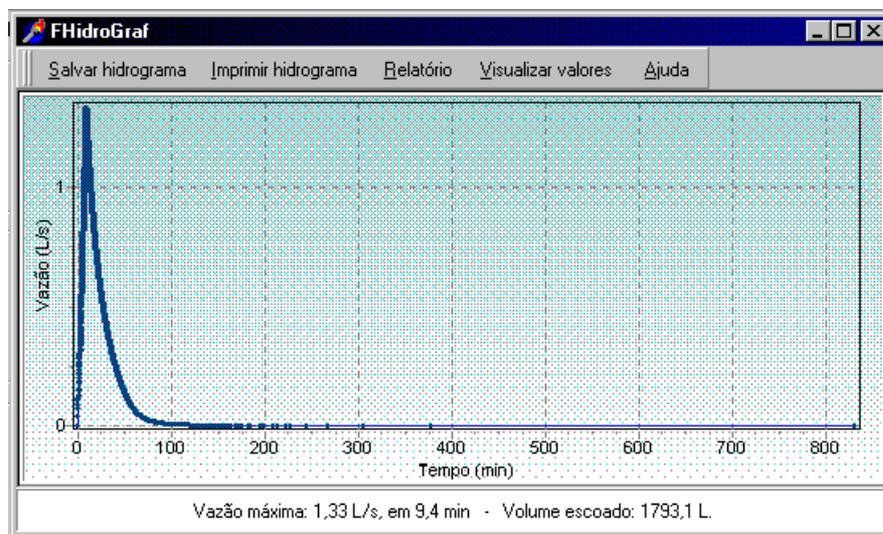


Figura 16 – Tela relativa ao módulo de resultados.

## 4.2. Avaliação do modelo

A seguir apresentam-se os resultados obtidos através do modelo desenvolvido e a comparação destes resultados com aqueles encontrados através de outros modelos bem como a análise de sensibilidade do modelo desenvolvido em relação aos seus parâmetros de entrada.

### 4.2.1. Encosta regular com solo saturado

No Quadro 1 são apresentados, para a condição de encosta regular e solo saturado, os resultados de vazão máxima e volume de escoamento superficial obtidos pelas simulações feitas através do HIDROBACIA e do HIDROGRAMA 1.0, bem como a diferença percentual entre esses resultados, considerando variações no comprimento, na condutividade hidráulica do solo saturado, na rugosidade do terreno e no período de retorno, sendo os demais fatores mantidos iguais aos da condição inicial.

Quadro 1 – Vazão máxima e volume escoado obtidos pelas simulações feitas através HIDROBACIA, e através do HIDROGRAMA 1.0 bem como a diferença percentual entre os resultados dos modelos ( $\Delta Q_H$  e  $\Delta V_H$ )

Fatores	HIDROBACIA		HIDROGRAMA 1.0		$\Delta Q_H$ (%)	$\Delta V_H$ (%)
	$Q_M$	$V_M$	$Q_H$	$V_H$		
	( $L s^{-1}$ )	(L)	( $L s^{-1}$ )	(L)		
Condição inicial	1,33	1793,4	1,33	1793,4		
$L_e = 10$ m	0,35	357,6	0,35	357,6	0,0	0,0
$L_e = 50$ m	1,33	1793,4	1,33	1793,4	0,0	0,0
$K_s = 50$ mm $h^{-1}$	1,02	1085,2	1,02	1085,2	0,0	0,0
$K_s = 70$ mm $h^{-1}$	0,7	655,1	0,7	655,1	0,0	0,0
$n_t = 0,04$ s $m^{-1/3}$	1,59	1758,8	1,59	1758,8	0,0	0,0
$n_t = 0,25$ s $m^{-1/3}$	1,10	1834,8	1,10	1834,8	0,0	0,0
$T = 5$ anos	1,00	1278,9	1,00	1278,9	0,0	0,0
$T = 20$ anos	1,73	2467,4	1,73	2467,4	0,0	0,0

Analisando-se o Quadro 1 observa-se que, para os valores de vazão máxima e volume de escoamento superficial, o HIDROBACIA e o HIDROGRAMA 1.0 apresentaram o mesmo resultado em todas as simulações. A igualdade dos resultados atingiu as expectativas, uma vez que para, a condição de solo saturado, em que velocidade de infiltração aproxima-se da VIB e converge

para o valor de  $K_s$ , as duas metodologias passam a apresentar a mesma filosofia para o cálculo do escoamento superficial.

No Quadro 2 são apresentados os resultados de vazão máxima e volume de escoamento superficial obtidos através do HIDROBACIA considerando-se a variação de apenas uma encosta ( $L_e$ ,  $K_s$ ,  $n_t$ ,  $T$ ,  $ICV$  ou  $ARM$ ) e mantendo as demais iguais à condição inicial. O Quadro 2 apresenta também a variação percentual da vazão máxima e volume de escoamento superficial em relação à condição inicial.

Quadro 2 – Vazão máxima e volume de escoamento superficial obtidos através do HIDROBACIA variando uma das condições da encosta e demais permanecendo iguais à condição inicial e variação percentual da vazão ( $\Delta Q_I$ ) e volume de escoamento superficial ( $\Delta V_I$ ) em relação à condição inicial ( $L_e = 50$  m,  $K_s = 30$  mm h<sup>-1</sup>,  $\theta_i = 0,499$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>,  $\theta_s = 0,5$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>,  $S_w = 0,01$ ,  $n_t = 0,12$  s m<sup>-1/3</sup>,  $T = 10$  anos,  $ICV = 0$  mm e  $ARM = 0$  mm)

Condições	$Q_M$ (L s <sup>-1</sup> )	$V_M$ (L)	$\Delta Q_I$ (%)	$\Delta V_I$ (%)
Condição inicial	1,33	1793,4	-	-
$L_e = 10$ m	0,35	357,6	-73,7%	-80,1%
$L_e = 30$ m	0,89	1075,7	-33,1%	-40,0%
$K_s = 50$ mm h <sup>-1</sup>	1,02	1085,2	-23,3%	-39,5%
$K_s = 70$ mm h <sup>-1</sup>	0,7	665,1	-47,4%	-62,9%
$n_t = 0,04$ s m <sup>-1/3</sup>	1,59	1758,8	19,5%	-1,9%
$n_t = 0,25$ s m <sup>-1/3</sup>	1,10	1830,6	-17,3%	2,2%
$T = 5$ anos	1,00	1278,9	-24,8%	-28,7%
$T = 20$ anos	1,73	2467,4	30,1%	37,6%
$ICV = 0,76$ mm	1,30	1760,8	-2,3%	-1,8%
$ICV = 1,5$ mm	1,24	1687,9	-6,8%	-5,9%
$ARM = 1,5$ mm	1,27	1722,9	-4,5%	-3,9%
$ARM = 3,00$ mm	1,21	1646,1	-9,0%	-8,2%

Analisando-se o Quadro 2 observa-se que a variação da vazão máxima e do volume de escoamento superficial em função dos fatores empregados podem ser explicados do seguinte modo:

- a)  $L_e$ : incrementando-se o comprimento da encosta aumenta a área da bacia de contribuição (células que contribuem com escoamento) e conseqüentemente, os valores de vazão máxima e volume de escoamento superficial. Na Figura 17 é mostrada a influência do comprimento da encosta no comportamento da vazão máxima e volume de escoamento superficial (área situada sob a curva representativa do escoamento superficial).
- b)  $K_s$ : com o aumento no valor de  $K_s$  aumenta o volume de água que se infiltra no solo, diminuindo a vazão que escoar sobre a superfície do terreno (Figura 18).
- c)  $n_t$ : o aumento da rugosidade do terreno aumenta o tempo de percurso da água e conseqüentemente, diminui o valor da vazão máxima. Encontrou-se pequena variação no volume de escoamento superficial, em função da variação da rugosidade do terreno. Esta variação pode ser explicada pelo aumento ou diminuição no tempo de oportunidade para a ocorrência da infiltração devido à respectiva diminuição ou ao aumento da rugosidade do terreno, que atua na velocidade de escoamento superficial (Figura 19).
- d)  $T$ : o aumento do período de retorno causou um aumento tanto na vazão máxima como no volume de escoamento superficial, isso ocorre porque, quanto maior o período de retorno, maior será a intensidade de precipitação e o volume precipitado, e conseqüentemente, maior será o escoamento superficial (Figura 20).

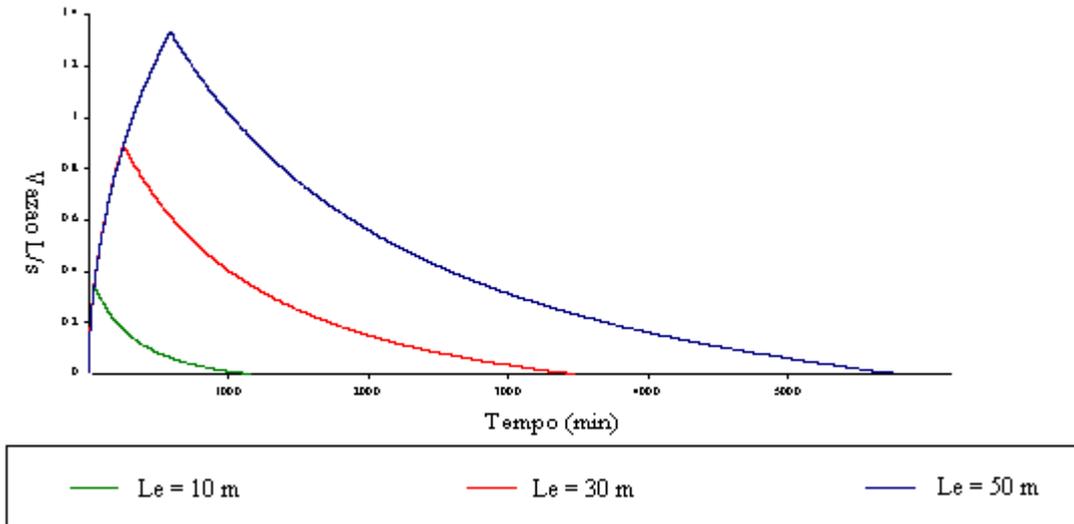


Figura 17 - Hidrogramas de escoamento superficial para encosta regular e solo saturado, referentes a valores de  $L_e$  iguais a 10; 30; e 50 m, considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

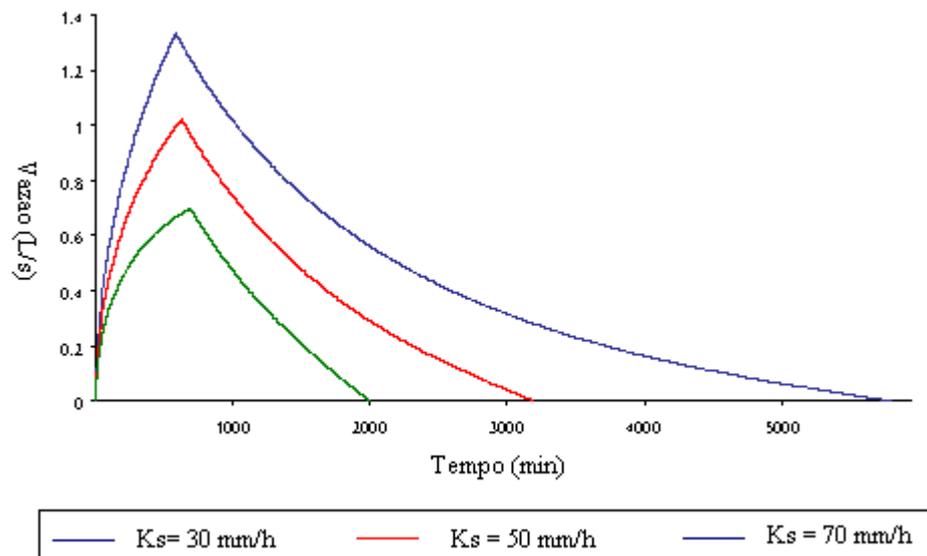


Figura 18 - Hidrogramas de escoamento superficial para encosta regular e solo saturado, referentes a valores de  $K_s$  iguais a 30; 50; e 70 mm  $h^{-1}$ , considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

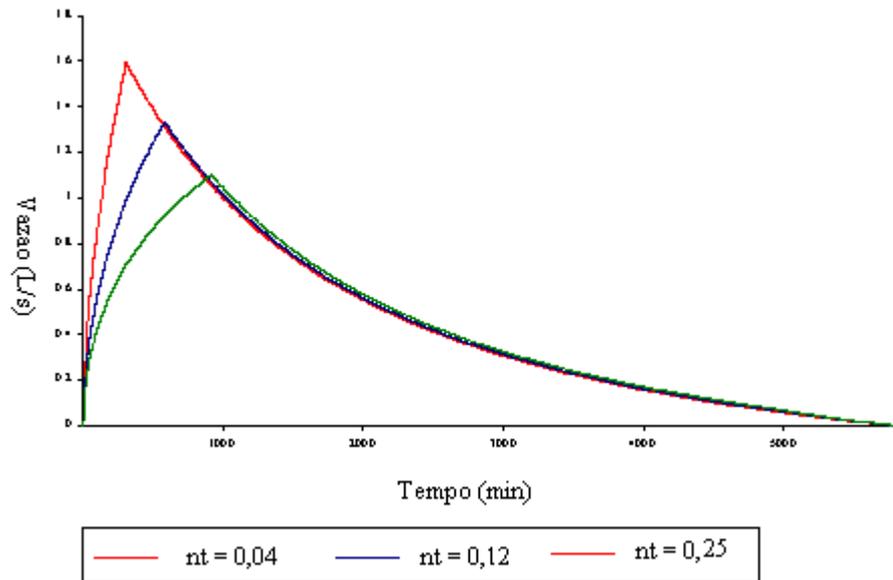


Figura 19 - Hidrogramas de escoamento superficial para encosta regular e solo saturado, referentes a valores de  $n_t$  iguais a 0,04; 0,12; e 0,025  $s\ m^{-1/3}$ , considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

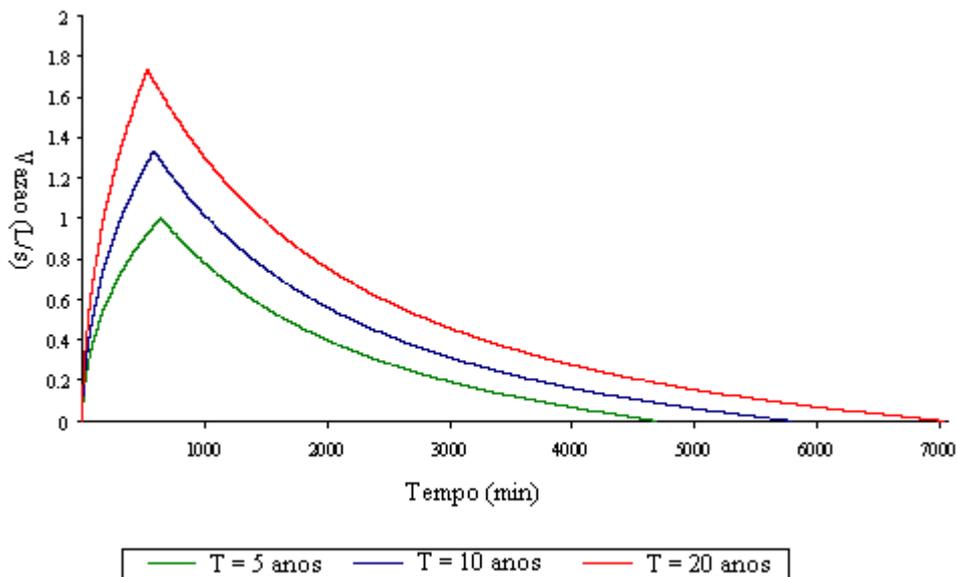


Figura 20 - Hidrogramas de escoamento superficial para encosta regular e solo saturado, referentes a valores de T iguais a 5; 10; e 20 anos, considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

- e) ICV: o aumento no valor da interceptação pela cobertura vegetal causou redução na vazão máxima e no volume de escoamento superficial, isso ocorre porque a cobertura vegetal contribui para uma redução no volume precipitado que atinge o solo (Figura 21).

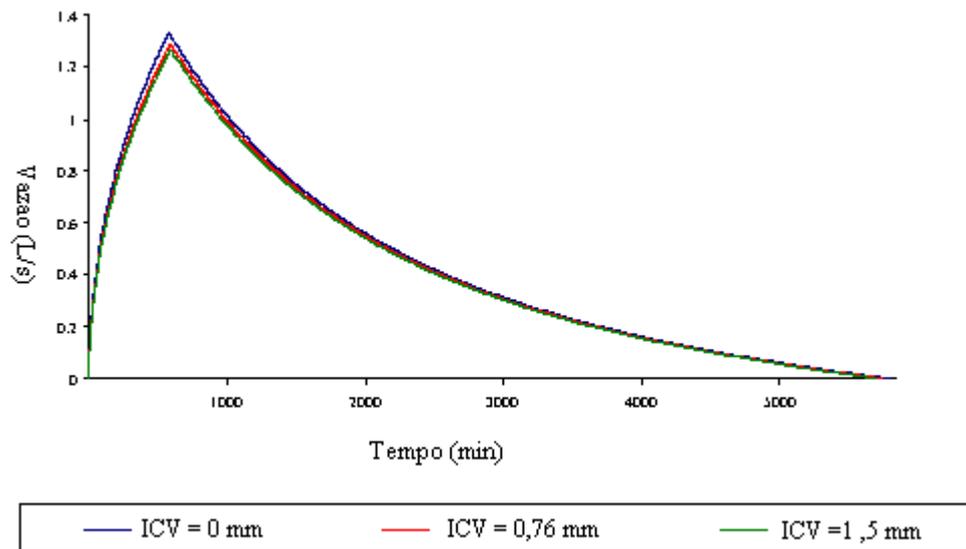


Figura 21 - Hidrogramas de escoamento superficial para encosta regular e solo saturado, referentes a valores de ICV iguais a 0; 0,76; e 1,5 anos, considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

- f) ARM: o armazenamento superficial contribui para a redução da vazão máxima e do volume de escoamento superficial, uma vez que a lâmina retida, temporariamente, como armazenamento superficial é transformada, posteriormente, em infiltração, reduzindo assim a vazão máxima e o volume de escoamento superficial (Figura 22).

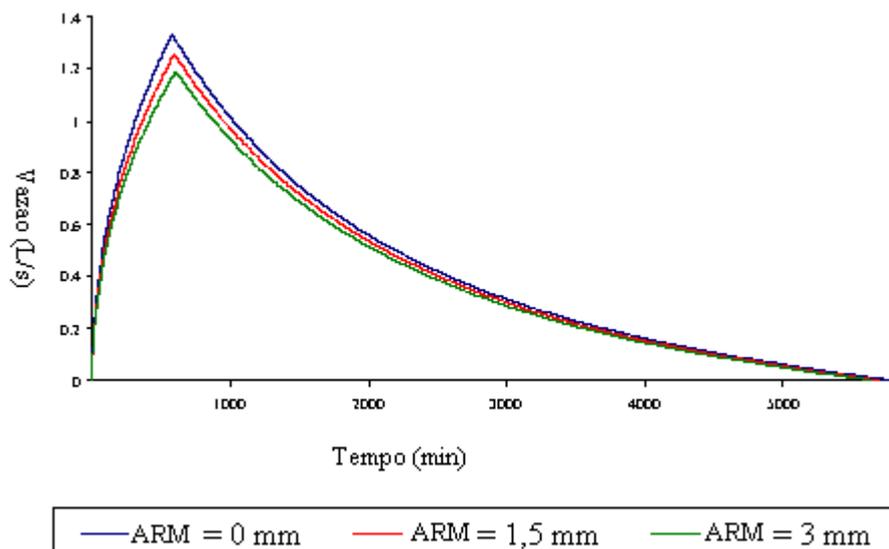


Figura 22 – Hidrogramas de escoamento superficial para a encosta regular e solo saturado, referentes a valores de ARM iguais a 0; 1,5; e 3 mm considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

No Quadro 3 estão apresentados os resultados de vazão máxima e volume de escoamento superficial, para a condição de canal e solo saturado, considerando variação de apenas um fator ( $L_c$ ,  $S_c$  ou  $n_c$ ) e mantendo os demais iguais aos da condição inicial. O Quadro 3 apresenta também a variação percentual da vazão e do volume de escoamento superficial das simulações em relação à condição inicial.

Quadro 3 – Vazão máxima e volume de escoamento superficial obtidos através do HIDROBACIA variando uma das condições do canal e demais permanecendo iguais à condição inicial bem como a variação percentual da vazão ( $\Delta Q_I$ ) e volume de escoamento superficial ( $\Delta V_I$ ) em relação à condição inicial

Fatores	$Q_M (L s^{-1})$	$V_M (L)$	$\Delta Q_I (\%)$	$\Delta V_I (\%)$
Condição inicial	704,85	1433685,02	-	-
$L_c = 500 \text{ m}$	812,18	1792106,28	15,2%	25,0%
$L_c = 300 \text{ m}$	575,84	1075263,76	-18,3%	-25,0%

$n_c = 0,005 \text{ s m}^{-1/3}$	949,88	1433685,02	34,8%	0,0%
$n_c = 0,10 \text{ s m}^{-1/3}$	313,468	1433685,02	-55,5%	0,0%
$S_c = 0,002 \text{ m m}^{-1}$	779,52	1433685,02	10,6%	0,0%
$S_c = 0,0005 \text{ m m}^{-1}$	617,12	1433685,02	-12,4%	0,0%

Analisando-se o Quadro 3 observa-se que a variação da vazão máxima e do volume de escoamento superficial no canal em função dos fatores empregados podem ser explicados do seguinte modo:

- a)  $L_c$ : Incrementando-se o comprimento do canal aumenta a área de contribuição e conseqüentemente, os valores de vazão máxima e volume de escoamento superficial (Figura 23).
- b)  $n_c$ : pela equação de Manning sabe-se que a vazão é inversamente proporcional à rugosidade do canal. Além desse fato, observou-se-se pelo Quadro 3 que, com o aumento da rugosidade do canal, aumenta o tempo de percurso da água nesse e conseqüentemente diminui o valor da vazão máxima. O volume de escoamento superficial não foi afetado pelas variações realizadas na rugosidade do canal (Figura 24).
- c)  $S_c$ : da equação de Manning sabe-se que a vazão de um canal com escoamento uniforme aumenta com o acréscimo da sua declividade. Com o aumento da declividade do canal, diminui o tempo de percurso da água nesse e o escoamento produzido atinge mais rapidamente a sua extremidade, desta forma, maior o valor da vazão máxima. O volume de escoamento superficial não foi afetado pelas variações realizadas na declividade do canal (Figura 25).

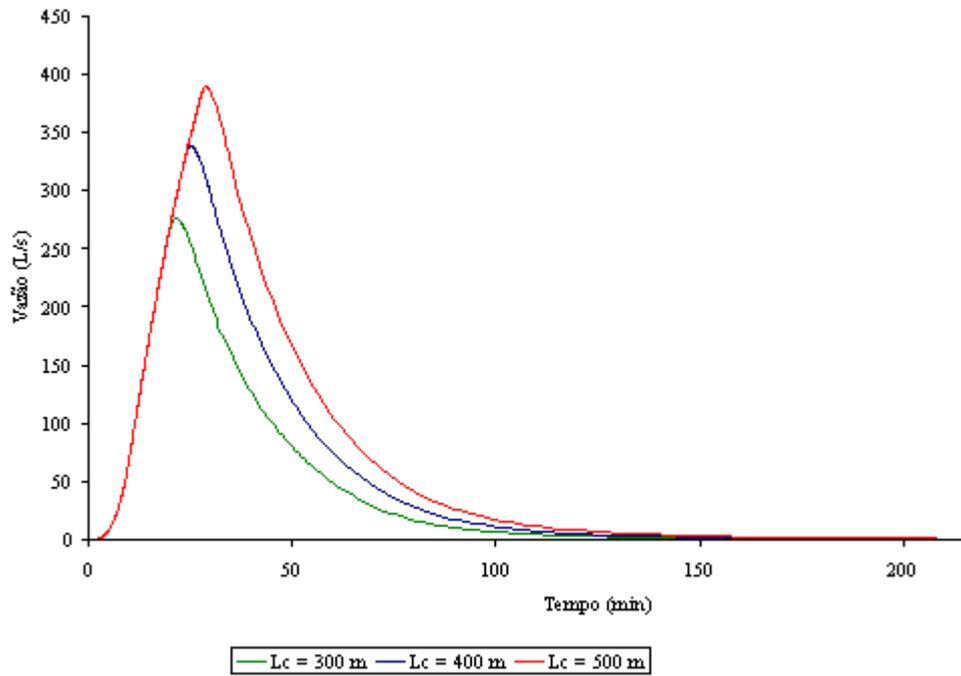


Figura 23 – Hidrogramas de escoamento superficial para o canal, referentes a valores de  $L_c$  iguais a 300; 400; e 500 m considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

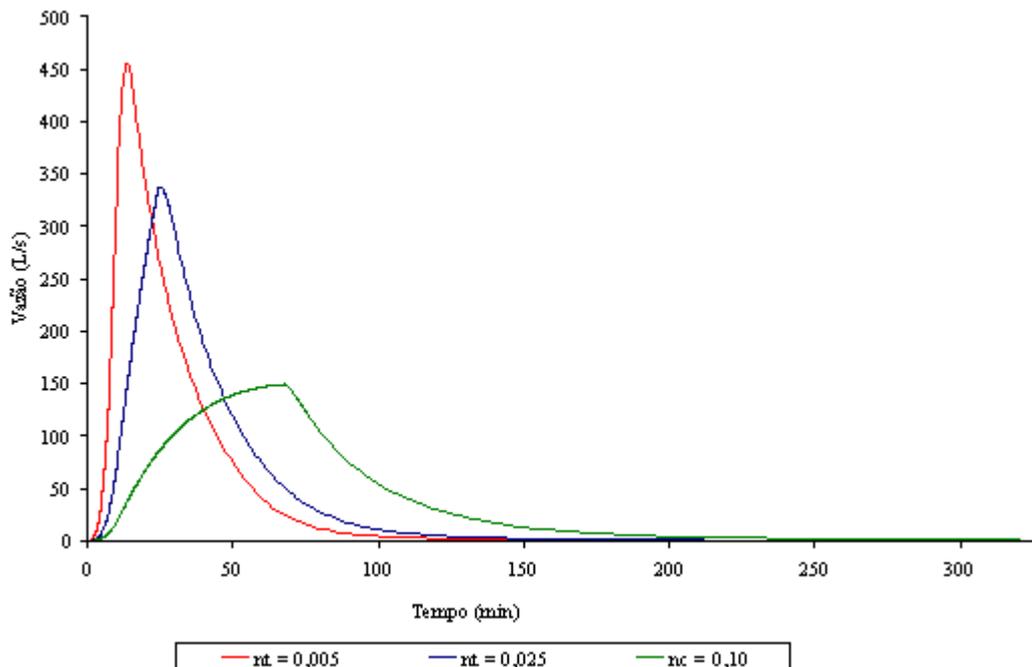


Figura 24 – Hidrogramas de escoamento superficial para o canal, referentes a valores de  $n_c$  iguais a 0,005; 0,025; e 0,10  $s\ m^{-1/3}$  considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

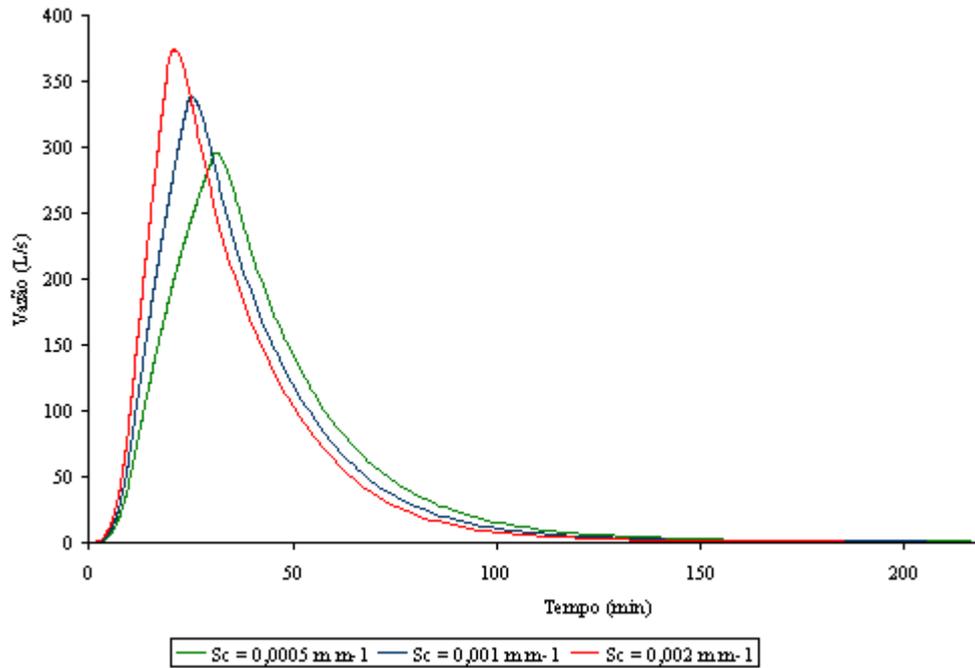


Figura 25 – Hidrogramas de escoamento superficial para o canal, referentes a valores de  $S_c$  iguais a 0,0005; 0,001; e 0,002  $m m^{-1}$  considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

#### 4.2.2 Encosta regular e solo com umidade inferior à saturação

No Quadro 4 são apresentados os resultados de vazão máxima e volume de escoamento superficial, para condição de encosta regular e solo com umidade inferior à saturação, obtidos através do HIDROBACIA considerando variação da umidade inicial e conseqüentemente do potencial matricial na frente de umedecimento, bem como a variação percentual da vazão e volume de escoamento superficial em relação à condição inicial.

Na Figura 26 é mostrado o hidrograma de escoamento superficial obtido considerando a variação da umidade inicial do solo e do potencial matricial na frente de umedecimento.

Quadro 4 – Vazão máxima e volume de escoamento superficial para variação nos valores de umidade inicial ( $\theta_i$ ) e considerando o potencial matricial na frente de umedecimento ( $S_w$ ), sendo os demais fatores mantidos iguais aos da condição inicial

Fatores	$Q_M$ ( $L\ s^{-1}$ )	$V_M$ (L)	$\Delta Q_I$ (%)	$\Delta V_I$ (%)
Condição inicial	1,33	1793,4	-	-
$\theta_i = 0,45\ cm^3\ cm^{-3}$ e $S_w = 70\ mm.c.a$	0,96	1390,5	27,8%	22,5%
$\theta_i = 0,40\ cm^3\ cm^{-3}$ e $S_w = 150\ mm.c.a$	0,55	758,8	58,6%	57,7%

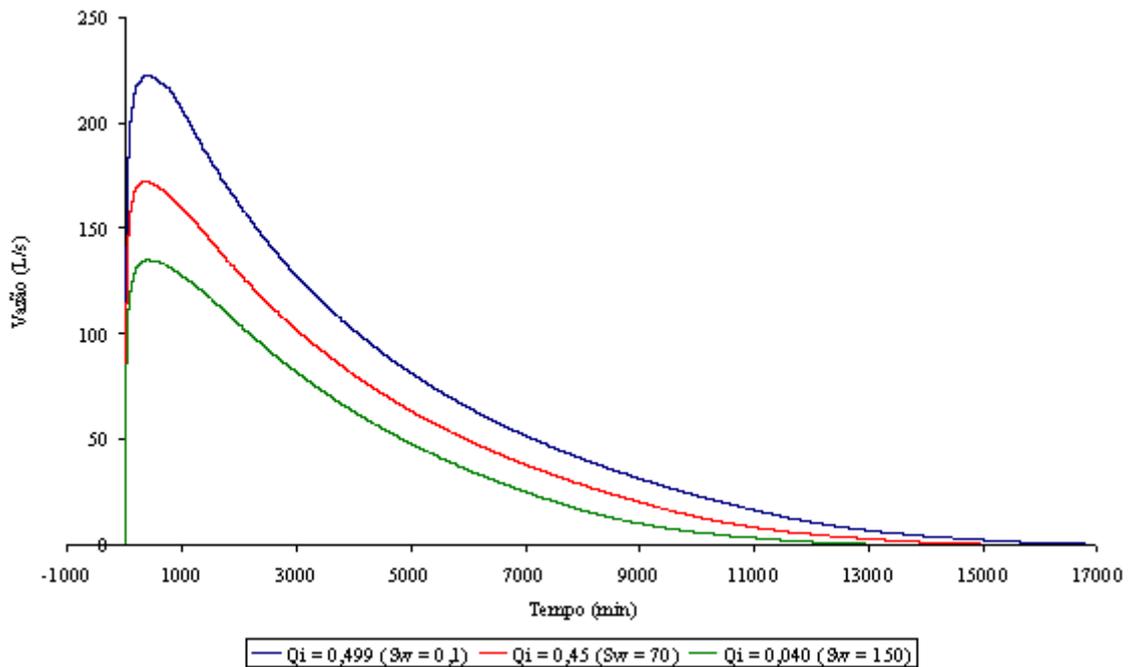


Figura 26 – Hidrogramas de escoamento superficial para encosta regular e solo com umidade inferior à saturação, referentes a valores de  $\theta_i$  iguais a 0,49 ( $S_w = 0,1\ mm.c.a$ ); 0,45 ( $S_w = 70\ mm.c.a$ ); e 0,40  $cm^3\ cm^{-3}$  ( $S_w = 150\ mm.c.a$ ) considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

Analisando-se o Quadro 4 e a Figura 27, observa-se que a vazão máxima de escoamento superficial diminuiu em 27,8% quando a umidade inicial do solo passou de uma condição saturada para um valor igual a  $0,45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $S_w = 70 \text{ mm.c.a}$ ) e diminuiu em 58,6% quando a umidade atingiu  $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $S_w = 250 \text{ mm.c.a}$ ). Nestas condições, o volume de escoamento superficial diminuiu em 22,5% e 57,7%, respectivamente. Este fato ocorre porque estando o solo com umidade inferior à saturação, a sua capacidade de infiltração é muito maior, e conseqüentemente, o volume escoado muito menor.

#### 4.2.3. Encosta irregular com solo saturado

O Quadro 5 mostra os resultados de vazão máxima obtidos pelas simulações feitas através do HIDROBACIA e do método racional bem como a diferença percentual entre eles. Esses resultados referem-se a encosta irregular com solo saturado variando em suas condições o comprimento, a condutividade hidráulica do solo saturado, a rugosidade do terreno, e o período de retorno.

Quadro 5 – Vazões máximas obtidas com o HIDROBACIA e método racional e a diferença percentual entre os resultados dos métodos

Fatores	HIDROBACIA $Q_M (\text{L s}^{-1})$	Método racional $Q_R (\text{L s}^{-1})$	Diferença (%) $\Delta Q_R (\text{L s}^{-1})$
Inicial	222,7	290,40	23,3%
$L_e = 60 \text{ m}$	96,45	85,88	12,3%
$L_e = 120 \text{ m}$	167,45	224,99	25,6%
$K_s = 5 \text{ mm h}^{-1}$	268,07	331,87	19,2%
$K_s = 70 \text{ mm h}^{-1}$	150,29	207,42	27,5%
$n_t = 0,04 \text{ s m}^{-1/3}$	265,36	306,15	13,3%
$n_t = 0,25 \text{ s m}^{-1/3}$	188,5	273,55	31,1%
$T = 5 \text{ anos}$	176,12	244,23	27,9%
$T = 20 \text{ anos}$	278,06	345,05	19,4%

Analisando-se o Quadro 5, observa-se que o valor de vazão máxima obtido pelo método racional superou os valores obtidos pelo HIDROBACIA em todas as condições. A maior variação percentual entre os resultados do modelo foi obtida para a rugosidade do terreno igual a  $0,25 \text{ s m}^{-1/3}$ , em que a vazão máxima obtida pelo método racional foi superior em 31,1% à obtida pelo HIDROBACIA. A menor diferença percentual foi obtida para o comprimento de encosta igual a 60 m correspondente à 12,3%.

No Quadro 6, são apresentados os resultados de vazão máxima e volume de escoamento superficial obtidos através do HIDROBACIA variando um dos fatores, bem como a variação percentual da vazão e volume de escoamento superficial em relação à condição inicial

Quadro 6 – Vazão máxima e volume de escoamento superficial obtidos através do HIDROBACIA variando um dos fatores referentes à condição da encosta irregular e solo saturado bem como a variação percentual da vazão e volume de escoamento superficial em relação a condição inicial

Fatores	$Q_M (\text{L s}^{-1})$	$V_M (\text{L})$	$\Delta Q_I (\%)$	$\Delta V_I (\%)$
Condição inicial	222,70	303326,8	-	-
$L_e = 60 \text{ m}$	156,73	19718,2	29,6%	93,5%
$L_e = 120 \text{ m}$	167,52	222151,3	24,8%	26,8%
$K_s = 5 \text{ mm h}^{-1}$	150,29	15481,2	32,5%	94,9%
$K_s = 70 \text{ mm h}^{-1}$	268,07	57991,5	20,4%	80,9%
$n_t = 0,04 \text{ s m}^{-1/3}$	265,36	28594,2	19,2%	90,6%
$n_t = 0,25 \text{ s m}^{-1/3}$	188,50	323069,0	15,4%	6,5%
$T = 5 \text{ anos}$	176,12	234636,2	20,9%	22,6%
$T = 20 \text{ anos}$	278,06	388894,7	24,9%	28,2%
$ICV = 0,76 \text{ mm}$	218,60	298851,2	1,8%	1,5%
$ICV = 1,5 \text{ mm}$	214,64	244329,8	3,6%	19,4%

ARM = 1,5 mm	214,24	293883,1	3,8%	3,1%
ARM = 3,00 mm	202,81	281131,6	8,9%	7,3%

Analisando-se o Quadro 6, observa-se que a vazão máxima e o volume de escoamento superficial tiveram comportamento similar ao observado nas simulações realizadas na condição de encosta regular e solo saturado (item 4.2.1) o que pode ser evidenciado nas Figuras 1A a 6A (Apêndice).

#### 4.2.4. Encosta irregular e solo com umidade inferior à saturação

No Quadro 7, são apresentados os resultados de vazão máxima e volume de escoamento superficial (condição de encosta irregular e solo com umidade inferior à saturação) obtidos através do HIDROBACIA variando a umidade inicial ( $\theta_i$ ) juntamente com potencial matricial na frente de umedecimento ( $S_w$ ), bem como a variação percentual da vazão e volume de escoamento superficial em relação a condição inicial.

Quadro 7 – Vazão máxima e volume de escoamento superficial para variação nos valores de umidade inicial ( $\theta_i$ ) juntamente com o potencial matricial na frente de umedecimento ( $S_w$ ), sendo os demais fatores mantidos iguais aos da condição inicial ( $L_e = 120$  m,  $\theta_i = 0,499$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>,  $\theta_s = 0,5$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>,  $S_w = 0,01$  mm,  $K_s = 30$  mm h<sup>-1</sup>,  $N_t = 0,12$  s m<sup>-1/3</sup>,  $T = 10$  anos,  $ICV = 0$  mm e  $ARM = 0$  mm)

Condições	$Q_M$ (L s <sup>-1</sup> )	$V_M$ (L)	$\Delta Q_I$ (%)	$\Delta V_I$ (%)
Condição inicial	222,70	303326,8	-	-
$\theta_i = 0,45$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> e $S_w = 70$ mm	171,99	245055,3	08	19
$\theta_i = 0,40$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> e $S_w = 150$ mm	135	191244,5	54	37

Analisando-se o Quadro 7, observa-se que a vazão máxima e o volume de escoamento superficial tiveram comportamento similar ao observado nas simulações realizadas na condição de encosta regular e solo com umidade inferior à saturação (item 4.2.2) o que pode ser evidenciado na Figura 7A (Apêndice).

## **5. RESUMO E CONCLUSÕES**

Desenvolveu-se uma metodologia que permite obter o hidrograma de escoamento superficial e, conseqüentemente, a vazão máxima e o volume escoado para qualquer posição ao longo de uma bacia hidrográfica para possibilitar a consideração da variabilidade espacial dos parâmetros de entrada do modelo proposto, dividiu-se a bacia hidrográfica em diversas células quadradas de mesmo tamanho, seguindo a filosofia dos Sistemas de Informações Geográficas.

Para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial na célula de interesse somou-se o hidrograma produzido na mesma com os hidrogramas advindo das células que contribuem com escoamento para a célula de interesse, levando-se em conta a complexidade do deslocamento do escoamento superficial na encosta e no canal. Foi empregado para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial produzido em cada célula um modelo de balanço hídrico que permite a consideração dos processos de precipitação, interceptação pela cobertura vegetal, infiltração da água no solo, armazenamento superficial e

escoamento superficial. Foram utilizadas as equações de chuvas intensas e de Green-Ampt modificada por Mein-Larson para quantificar a intensidade média de precipitação e a infiltração da água no solo, respectivamente. Para possibilitar a aplicação da metodologia desenvolvida, elaborou-se um software, denominado HIDROBACIA, utilizando como ferramenta de programação o Delphi 5.0.

Com o intuito de analisar o comportamento do modelo, realizou-se diversas simulações, que permitiram a comparação do modelo desenvolvido com outros já existentes (Hidrograma 1.0 e método racional) e realizou-se testes para análise da sensibilidade deste e variação dos parâmetros de entrada do modelo.

Com base nos resultados obtidos concluiu-se que:

- os valores obtidos pelo modelo para condições de solo saturado, interceptação pela cobertura vegetal e armazenamento superficial nulos foram iguais aos encontrados pelo do Hidrograma 1.0;
- os valores de vazão máxima obtidos pelo modelo foram de 13,3 à 13,3% inferiores aos encontrados pelo método racional; e
- o modelo desenvolvido demonstrou sensibilidade às variações das condições de precipitação, interceptação pela cobertura vegetal, armazenamento superficial, condutividade hidráulica do solo saturado, umidade inicial, umidade de saturação e potencial matricial na frente de umedecimento, rugosidade hidráulica e declividade do terreno, rugosidade e geometria do canal, e distância percorrida pelo escoamento superficial.

## **6. RECOMENDAÇÕES**

A seguir apresenta-se algumas recomendações que deverão ser seguidas em etapas futuras, visando o aprimoramento do modelo proposto no presente trabalho:

- considerações de canais com geometria diferente da triangular, a qual não representa adequadamente a condição relativa a canais naturais;
- aperfeiçoamento na metodologia para que a identificação dos canais naturais seja feita através da imagem de elevação, e não através da imagem de hidrografia;
- inclusão de um termo que leve em consideração a variação da retenção de água sobre a superfície do solo, ou no canal, em decorrência da variação da profundidade do escoamento superficial;
- utilização do modelo de ondas cinemáticas para a descrição do escoamento superficial; e

- realização de trabalhos experimentais, visando a validação do modelo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAN, O. Time of concentration of overland flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.112, n.4, p.283-92, 1986.
- ANDERSON, M.G., BURT, T.P. Modelling Strategies. In: ANDERSON, M.G., BURT, T.P. (Eds.). **Hydrological Forecasting**. Chichester: Willey, 1985. Cap.1, p.1-13.
- BARROSO, D.G., SILVA, M.L.N. Poluição e conservação dos recursos hídricos naturais: solo e água. **Informe Agropecuário**, v.176, n.16, p.17-24, 1992.
- BLAKE, G.J. Interception and phytomorphology. Wellington. **Hydrological Research**, (Progress Report n.9).
- BEASLEY, D.B., HUGGINS, L.F. **Answers: user's manual**. Chicago: United States Environmental Protection Agency, Region V, 1981. 51p.
- BONTA, J.V., RAO, A.R. Estimating peak flows from small agricultural watersheds. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.118, n.1, p.122-137, 1992.

BRAKENSIER, D.L., RAWLS, W.J. An infiltration based runoff model for a standardized 24-hour rainfall. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.2, p.1607-1611, 1982.

CORRADINI, C., MORBIDELLI, R., MELONE, F. On the interaction between infiltration and hortonian runoff. **Journal of Hydrology**, v.204, p.52-67, 1988.

CASTRO FILHO, C., BISCAIA, R.C.M. Estudos de conservação do solo em bacias hidrográficas. In: Encontro nacional de pesquisas sobre conservação do solo, 3, Recife, 1981. **Anais ... Recife, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 3, Recife, 1981.

DeCOURSEY, D.G. Runoff, erosion and crops yield simulation for land use management. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.2, p.379-386, 1980.

GREGORY, J.M. Time of concentration determination for small watersheds. **Transactions of the ASAE**, v.25, n.3, p.686-688, 1982.

JENSON, S.K. Application of hydrologic information automatically extracted from digital information models. **Hydrological Processes**, v.5, p.31-44, 1991.

LINSLEY JR., R.K., KOHLER, M.A., PAULHUS, J.L.H. **Hydrology for Engineers**. New York, McGraw-Hill, 1975. 482p.

LUTHIN, J.N. **Drainage Engineering**. New York, Robert & Krieger, 1973. 250p

MARTINS, J.A. Escoamento superficial. In: PINTO, N.S.L. et al. Hidrologia básica. São Paulo, Edgard Blücher, 1976. p.36-67, 1988.

Mc CULLOCH, J.S.G., ROBINSON, M. History of forest hydrology. **Journal of Hydrology**, v.150, p.189-216, 1993.

- MITCHELL, J.R., ENGEL, B.A., GRINIVASAN, R., WANG, S.S.Y. Validation of AGNPS for small watersheds using an integrated AGNPS/GIS system. **Water Resources Bulletin**. v.29, n.5, p.833-842, 1993.
- MOSES D.E.C., PRICE, A.G. An evaluation of the gash interception model in a northern hardwood stand. **Journal of Hydrology**. v.214, p.103-110, 1999.
- MOORE, I.D., GRAUSON, R.B., LADSON, A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, **Hydrological Processes**, v.5, p.3-30, 1991.
- MOORE, I.D., BURCH, G.J., MACKENZIE, D.H. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. **Transactions of the ASAE**, v.31, n.4, p.1098-1107, 1988.
- PATHAK, P., LARYEA, R.B., SUDI, R. A runoff model for small watersheds in the semi-arid tropics. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.5, p.1619-1624, 1989.
- SAVABI, M.R., FLANGAN, D.C., HEBEL, B., ENGEL, B.A. Application of WEPP and GIS-GRASS to a small watershed in Indiana. **Journal of Soil and Water Conservation**. v.50, n.5, p.477-483, 1995.
- STUBE, M., JOHNSTON, D. M. Runoff volume estimation using GIS Techincs. **Water Resources Bulletin**, v.26, n.4, p.611-620, 1990.
- PRUSKI, F.F. **Desenvolvimento de Metodologia para o Dimensionamento de Canais de Terraços**. Viçosa, MG: UFV. 1993. 97p. Tese (doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1993.
- PRUSKI, F.F., SILVA, D.D. Escoamento superficial. Viçosa, MG: AEGMG; DEA; UFV, 1997. 33p. (Caderno didático, 26).
- PRUSKI, F.F., SILVA, J.M.A., RODRIGUES, L.N., SILVA, D.D. A model to obtain the hydrograph of surface runoff in terraced areas. In: PEREIRA, L.S., GOWING, J.W. **Water and the environment: innovation issues in irrigation and drainage**. Londres: E&FN Spon 1998.

- PRUSKI, F.F., RODRIGUES, L.N., SILVA, D.D., COSTA, M H. An hydrologic model to simulate the water balance on agricultural land. **Transactions of the ASAE**, 1999. (No prelo).
- RISSE, L.M., NEARING, M.A., SAVABI, M.R. Determining the Green-Ampt effective hydraulic conductivity from rainfall-runoff data for the Wepp model. **Transactions of the ASAE**, v.37, n.2, p.411-418, 1994.
- SCHWAB, G.O., FREVERT, R.K., EDMINSTER, T.W. et al. **Soil and water conservation engineering**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1966.683p.
- SILVA, J.M.A. **Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial para qualquer ponto ao longo de uma enconsta**. Viçosa, MG: UFV. 1999. 61p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- SKAGGS, R.W., KHALEEL, R. Infiltration. In: HAAN, C.T., JOHNSON, H. P., BRAKENSTEK, D.L. (Eds.). **Hydrologic modeling of small watersheds**. St. Joseph, Mich.: ASAE, 1982. Cap.4, p.121-166.
- SOUCHERE, V., DING, D., DAROUSSIN, J., PAPY, F., CAPILLON, A. Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. **Journal of Hydrology**, v.206, p.256-267, 1998.
- SUAREZ, G. A. S. Abstração inicial de uma bacia hidrográfica de floresta natural na região de Viçosa, Minas Gerais. Viçosa: UFV, 1995. 54p. (dissertação de mestrado).
- TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 669p.
- VÉLEZ, O.L.P., BERNASCONI, W.G., RENAUD, B.C. Geometric analysis of surface runoff and the computation order of unit elements in distributed hydrological models. **Journal of Hydrology**, v.211, p.266-274, 1998.
- JULIEN, P.Y., SAGHAFIAN, B., OGDEN, F.L. Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff. **Water Resources Bulletin**, v.31, n.3, p.523-536, 1995.

VIEUX, B.E. Geographic information systems and non-point source water quality and quantity modelling. **Hydrological Processes**, v.5, p.101-113, 1991.

WHITEHEAD, P. G., ROBINSOM, M. Experimental basin studies – an international and historic perspective of forest impacts. **Journal of Hydrology**, v. 45, p.217-230, 1993.

WOOD, E.F., SIVALAPAN, M., BEVEN, K., BAND, L. Effects of spatial variability and scales with implications to hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v.102, p.29-47, 1988.

WOOLHISER, D.A. Search for physically based runoff model – a hydrologic El Dorado?. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.122, n.3, p.122-129, 1996.

## **APÊNDICE**

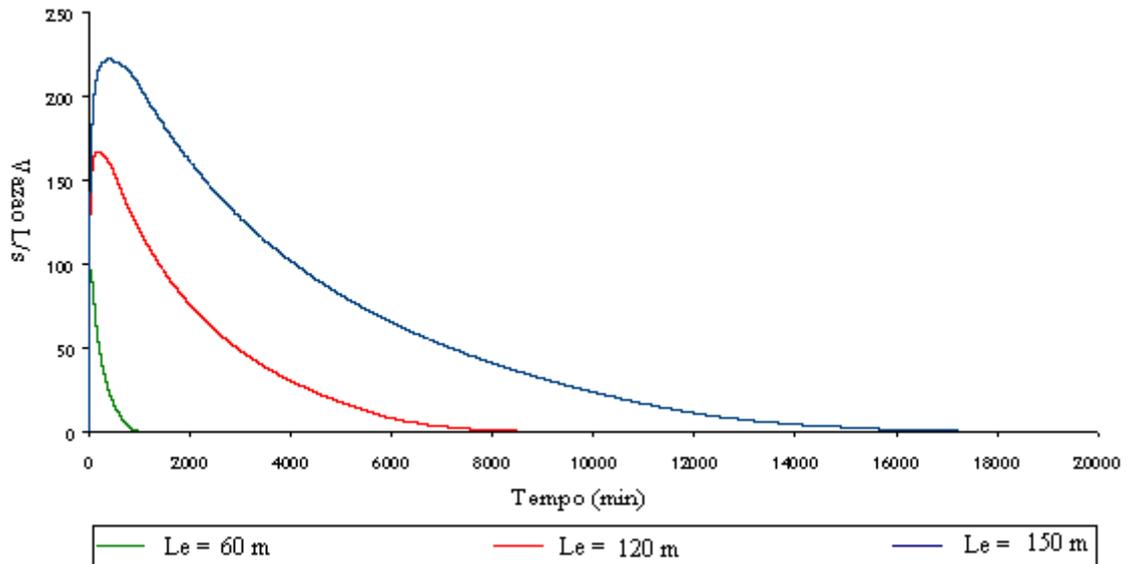


Figura 1A – Hidrogramas de escoamento superficial para encosta irregular, referentes a valores de  $L_e$  iguais a 60, 120 e 150 m e considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

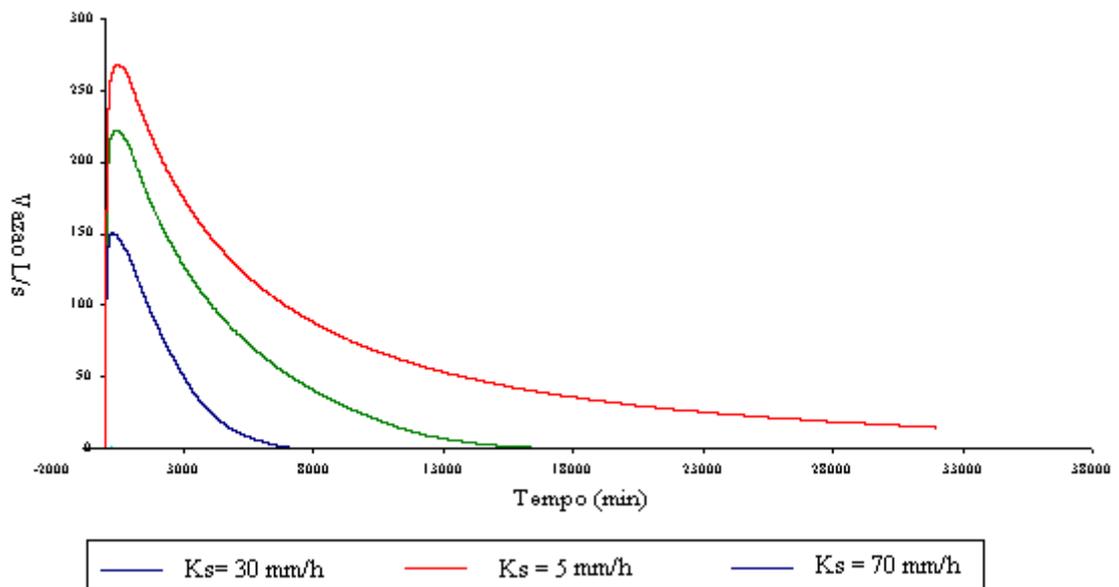


Figura 2A – Hidrogramas de escoamento superficial para encosta irregular, referentes a valores de  $K_s$  iguais a 5; 30; e 70 mm  $h^{-1}$  e considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

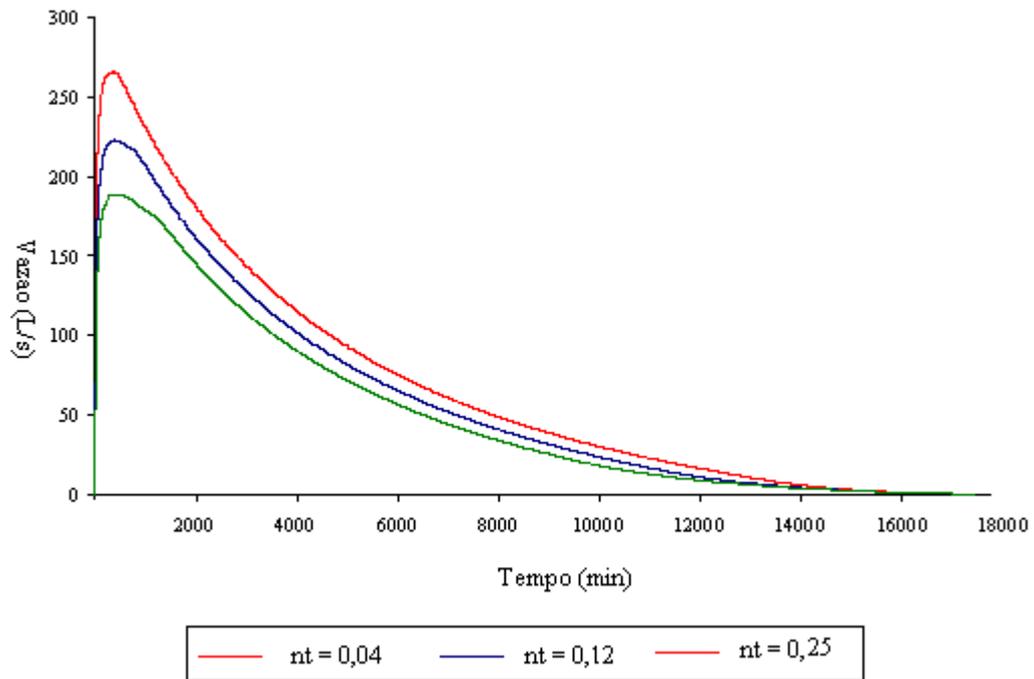


Figura 3A – Hidrogramas de escoamento superficial para encosta irregular, referentes a valores de  $N_t$  iguais a 0,04; 0,12; e 0,25  $s\ m^{-1/3}$  e considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

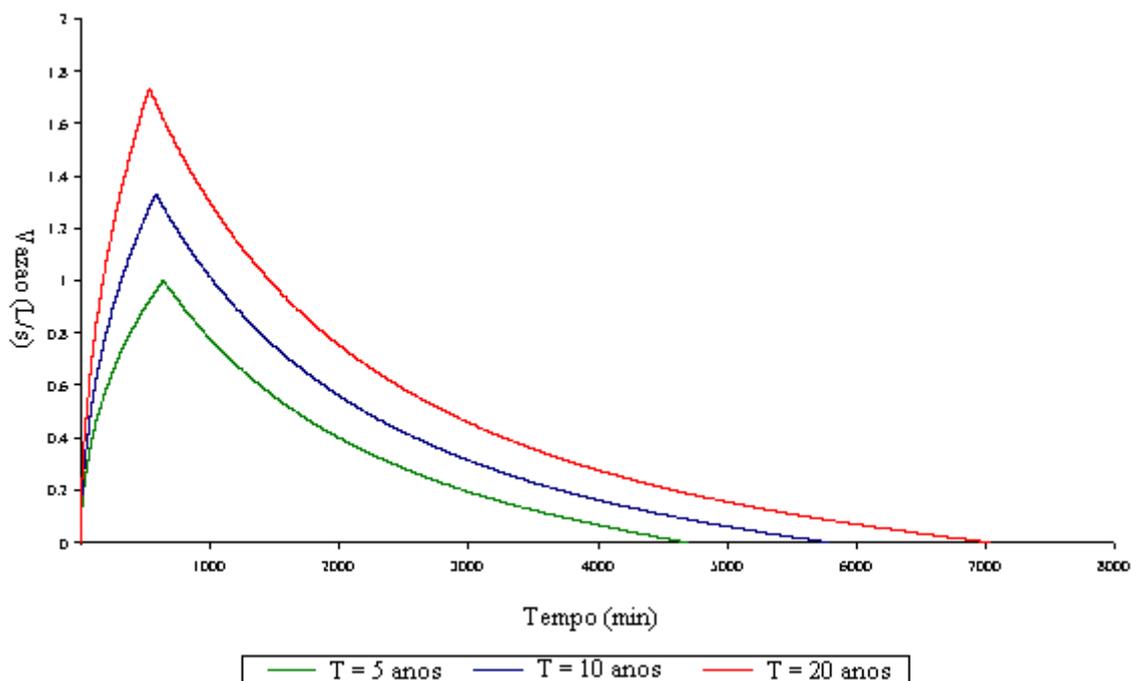


Figura 4A – Hidrogramas de escoamento superficial para encosta irregular, referentes a valores de T iguais a 5; 10; e 20 anos e considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

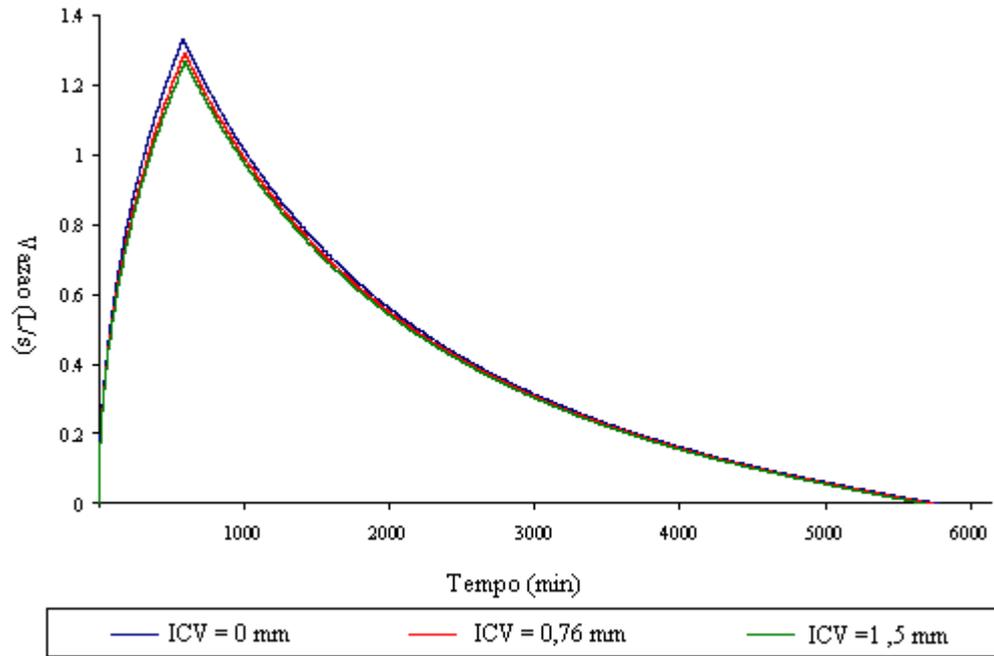


Figura 5A – Hidrogramas de escoamento superficial para encosta irregular, referentes a valores de ICV iguais a 0, 0,76 e 1,5 mm e considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

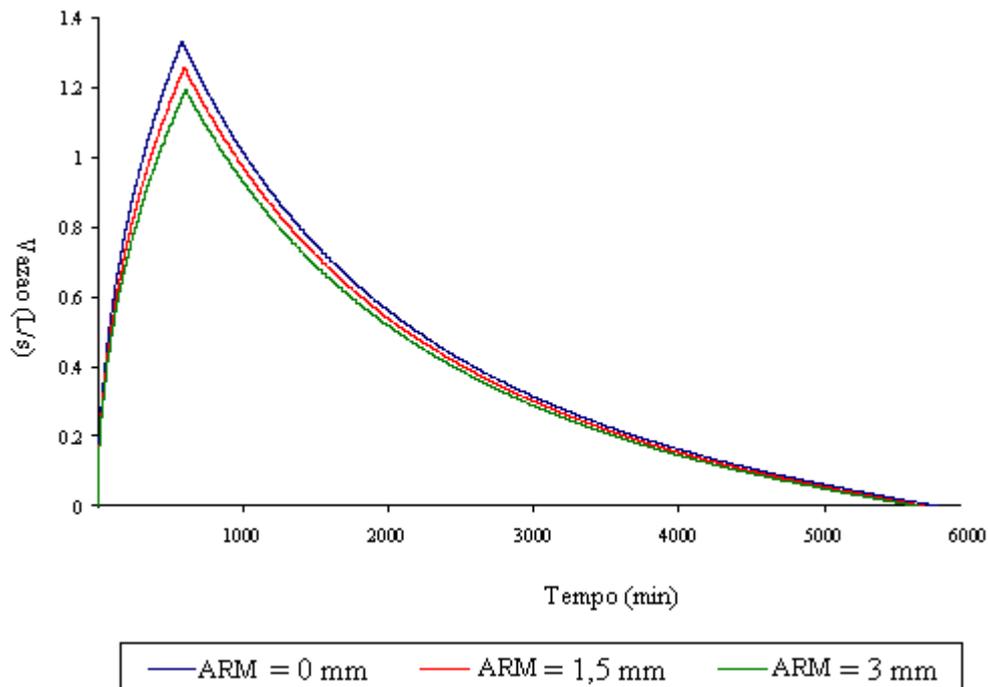


Figura 6A – Hidrogramas de escoamento superficial para encosta irregular, referentes a valores de ARM = 0, 1,5 e 3 mm e considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.

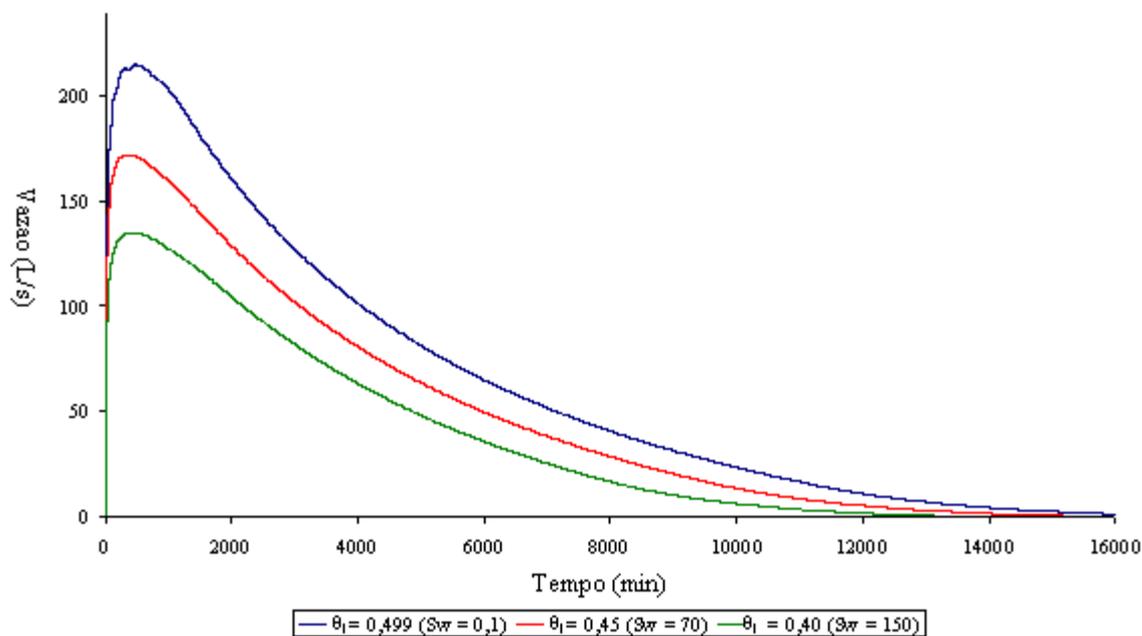


Figura 7A - Hidrogramas de escoamento superficial para encosta irregular e solo com umidade inferior à saturação, referentes a valores de  $\theta_i$  iguais a 0,49 ( $S_w = 0,1$  mm.c.a); 0,45 ( $S_w = 70$  mm.c.a); e 0,40  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  ( $S_w = 150$  mm.c.a) considerando os demais fatores iguais aos da condição inicial.