

**JOSÉ MÁRCIO ALVES DA SILVA**

**METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO  
HIDROGRAMA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL  
AO LONGO DE UMA ENCOSTA**

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  
ABRIL – 1999

**JOSÉ MÁRCIO ALVES DA SILVA**

**METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO  
HIDROGRAMA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL  
AO LONGO DE UMA ENCOSTA**

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

APROVADA: 9 de outubro de 1998.

Antônio Teixeira de Matos

Neylor Alves Calasans Rego

Demétrius David da Silva  
(Conselheiro)

Maria Lúcia Calijuri  
(Conselheira)

Fernando Falco Pruski  
(Orientador)



## AGRADECIMENTO

A Deus, por seu amor e sua paciência para com a humanidade.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Civil, pela formação profissional.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização deste curso.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Fernando Falco Pruski, pela orientação, pelo incentivo, pela amizade e compreensão.

Ao Professor Demetrius David da Silva, pela orientação, pelo incentivo e pela amizade, e à sua esposa Ângela Maria Quintão Lana.

À minha família, em especial aos meus pais Luiza Marilac Alves da Silva e Francisco Angelo da Silva, pela educação, pelo carinho e pelos incentivos que sempre me ofereceram.

À minha esposa Maria Aparecida Gonsaga, pela compreensão e pelo apoio nos momentos certos.

Aos meus queridos amigos Apovianos, pelos muitos anos de convivência, pelo trabalho, pela dedicação, perseverança e oração.

Aos colegas do curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, em especial a Nori Paulo Griebeler, Adriane Regina Bortolozzo e Lineu Neiva Rodrigues.

A Wellington Lima dos Santos, pelas dicas de programação, e a Juliana Cristina Braga.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola.

A todos aqueles que direta ou indiretamente participaram da realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

JOSÉ MÁRCIO ALVES DA SILVA, filho de Luiza Marilac Alves da Silva e Francisco Angelo da Silva, nasceu em Ponte Nova, MG, em 14 de fevereiro de 1972.

Em 1989, concluiu o segundo grau no COLUNI (Colégio Universitário), em Viçosa, MG.

Em setembro de 1996, concluiu o curso de Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa.

Em outubro de 1996, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de concentração Irrigação e Drenagem, submetendo-se à defesa de tese em 9 de outubro de 1998.

## CONTEÚDO

|  |     |
|--|-----|
| LISTA DE SÍMBOLOS.....   | vii |
| EXTRATO .....  | xi  |
| ABSTRACT .....   | x   |
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 1   |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA.....  | 4   |
| 2.1. O ciclo hidrológico.....  | 4   |
| 2.2. escoamento superficial .....  | 6   |
| 2.3. Conseqüências do escoamento superficial .....   | 12  |
| 2.4. A utilização de sistemas de informações geográficas .....   | 14  |
| 3. METODOLOGIA.....  | 17  |
| 3.1. Geração do banco de dados.....  | 18  |
| 3.1.1. Divisão do mapa para digitalização .....  | 18  |
| 3.1.2. Digitalização e edição do relevo e das características da encosta .....                               | 19  |
| 3.1.3. Geração das imagens utilizadas pelo software.....   | 19  |
| 3.1.3.1. Geração da imagem de elevação.....  | 20  |
| 3.1.3.2. Geração das imagens das subáreas contendo características<br>distintas de rugosidade e da VIB ..... | 20  |
| 3.2. Obtenção do hidrograma de escoamento superficial para qualquer<br>local de uma encosta .....            | 21  |

|  |    |
|--|----|
| 3.2.1. Obtenção do hidrograma de escoamento superficial para qualquer pixel ao longo da encosta .....                | 24 |
| 3.2.2. Obtenção do hidrograma de escoamento superficial concentrado no canal do terraço ou dreno de superfície ..... | 27 |
| 3.2.3. Obtenção do volume de escoamento superficial.....   | 29 |
| 3.3. Desenvolvimento do software.....  | 29 |
| 3.3.1. Fluxograma de funcionamento do software.....  | 30 |
| 3.3.1.1. Entrada de dados.....   | 30 |
| 3.3.1.2. Verificação da entrada dos dados .....  | 30 |
| 3.3.1.3. Cálculo da declividade.....   | 32 |
| 3.3.1.4. Visualização do modelo digital de elevação da encosta.....  | 32 |
| 3.3.1.5. Escolha do pixel de interesse para traçado do hidrograma.....   | 33 |
| 3.3.1.6. Tipo de hidrograma.....   | 33 |
| 3.3.1.7. Visualização do hidrograma .....  | 34 |
| 3.3.2. Estrutura do software .....   | 34 |
| 3.3.2.1. Módulo principal.....   | 34 |
| 3.3.2.2. Módulo entrada de dados.....  | 34 |
| 3.3.2.2.1 Precipitação .....   | 35 |
| 3.3.2.2.2 Rugosidade do terreno .....  | 35 |
| 3.3.2.2.3 Rugosidade do canal .....  | 35 |
| 3.3.2.3. Declividade da parede de montante do canal (Sm).....  | 36 |
| 3.3.2.4. Cobertura vegetal.....  | 36 |
| 3.3.2.5. Módulo de visualização do modelo digital de elevação da encosta .....                                       | 36 |
| 3.3.2.6. Módulo hidrograma .....   | 36 |
| 3.4. Análise do comportamento do modelo para diferentes condições do canal e da encosta.....                         | 36 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....   | 40 |
| 4.1. Software Hidrograma 1.0.....  | 40 |
| 4.2. Hidrogramas de escoamento superficial .....   | 45 |
| 4.2.1. Influência do comprimento do canal e da encosta nos hidrogramas de escoamento superficial.....                | 45 |
| 4.2.2. Influência da VIB nos hidrogramas de escoamento superficial.....  | 49 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2.3. Influência da rugosidade do terreno no hidrograma de escoamento superficial ao longo da encosta.....                    | 52 |
| 4.2.4. Análise da influência da declividade do canal na vazão do escoamento superficial.....                                   | 53 |
| 4.2.5. Análise da influência da rugosidade do canal na vazão do escoamento superficial.....                                    | 55 |
| 4.2.6. Hidrograma de escoamento superficial levando em consideração a variação espacial da rugosidade da encosta e da VIB..... | 56 |
| 5. RESUMO E CONCLUSÕES.....  | 58 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 60 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A$  = área da bacia de contribuição, ha.
- $a$  = parâmetro relacionado à estação pluviográfica.
- $aa$  = inclinação da parede de montante do canal do terraço ou dreno de superfície, graus.
- $b$  = parâmetro relacionado à estação pluviográfica.
- $bb$  = inclinação do terreno, graus.
- $c$  = parâmetro relacionado à estação pluviográfica.
- $C$  = coeficiente de escoamento, adimensional.
- $C_i$  = cota da linha  $i$ , m.
- $C_{i+1}$  = cota da linha  $i+1$ , m.
- $CN$  = número da curva, que define o complexo hidrológico solo-vegetação, adimensional.
- $D$  = declividade do pixel,  $m\ m^{-1}$ .
- $EH$  = espaçamento horizontal entre os canais, m.
- $Ia$  = abstrações iniciais, mm.
- $i_i$  = intensidade instantânea de precipitação, em  $mm\ h^{-1}$ .
- $i_i[i, j, t+t_d]$  = intensidade instantânea de precipitação no pixel  $[i, j]$  para o tempo  $t+t_d$ ,  $mm\ h^{-1}$ .
- $i_m$  = intensidade máxima média de precipitação,  $mm\ h^{-1}$ .

- $K$  = parâmetro relacionado à estação pluviográfica.
- $L$  = comprimento do terraço ou dreno de superfície, m.
- $n$  = número de colunas.
- $n_c$  = coeficiente de rugosidade de Manning para o canal,  $s\ m^{-1/3}$ .
- $n_s$  = coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning para a superfície do solo,  $s\ m^{-1/3}$ .
- $p$  = tamanho do pixel na direção da linha de maior declividade do terreno, m.
- $Q$  = vazão máxima de escoamento,  $m^3\ s^{-1}$ .
- $q_c[j-1, t]$  = vazão para a coluna  $j-1$  no tempo  $t$ ,  $m^3\ s^{-1}$ .
- $q_c[j, t+t_{can}]$  = vazão no canal para a coluna  $j$  e tempo  $t+t_{can}$ ,  $m^3\ s^{-1}$ .
- $q_t[i-1, j, t]$  = vazão existente no pixel  $[i-1, j]$  para um tempo igual a  $t$ ,  $m^3\ s^{-1}$ .
- $q_t[i, j, t+t_d]$  = vazão existente no pixel  $[i, j]$  para um tempo igual a  $t+t_d$ ,  $m^3\ s^{-1}$ .
- $q_t[r, j, t+t_{can}]$  = vazão na última linha da coluna  $j$  no tempo  $t+t_{can}$ ,  $m^3\ s^{-1}$ .
- $q_t[r, j-1, t]$  = vazão na última linha da coluna  $j-1$  no tempo  $t$ ,  $m^3\ s^{-1}$ .
- $r$  = número de linhas.
- $S_c$  = declividade do canal,  $m\ m^{-1}$ .
- $S_m$  = declividade da parede de montante do canal.
- $S_t$  = declividade do terreno,  $m\ m^{-1}$ .
- $T$  = período de retorno, anos.
- $t$  = duração da precipitação, min.
- $t_{can}[i, j, t]$  = tempo que a vazão que ocorre na coluna  $j-1$  no tempo  $t$  leva para atingir a coluna  $j$ , min.
- $t_d[i, j, t]$  = tempo que a vazão que ocorre na linha  $i-1$  no tempo  $t$  leva para atingir a linha  $i$  para uma dada coluna  $j$ , min.
- $t_{ia}$  = intervalo de tempo compreendido entre o início da chuva e o início do escoamento superficial, min.
- $VIB$  = velocidade de infiltração básica,  $mm\ h^{-1}$ .
- $y_{can}$  = altura da lâmina d'água na seção do canal, m.
- $y_t[i-1, j]$  = altura da lâmina d'água, para a linha  $i-1$  de uma dada coluna  $j$  no tempo  $t$ , m.

## EXTRATO

SILVA, José Márcio Alves da, M.S., Universidade Federal de Viçosa, abril de 1999. **Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial ao longo de uma encosta.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Conselheiros: Demetrius David da Silva e Maria Lúcia Calijuri.

Desenvolveu-se uma metodologia que permite obter o hidrograma de escoamento superficial e a vazão máxima para qualquer posição ao longo de uma encosta e para seções transversais de canais de terraços ou drenos de superfície. A área da encosta foi dividida num sistema matricial composto por 100 linhas e 100 colunas. Na encosta, considerou-se que a vazão ocorre na direção da declividade desta e que a vazão de cada pixel é a soma da vazão produzida neste e a vazão produzida nos pixels que contribuem com escoamento superficial para o pixel em análise. No canal, a vazão foi contabilizada como a soma das vazões das colunas do sistema reticulado. Foi desenvolvido um software utilizando a linguagem de programação Delphi, para a aplicação da metodologia. Como resultado, o software fornece o hidrograma de escoamento superficial para qualquer posição ao longo da encosta e para seções transversais do canal do terraço ou dreno de superfície, além da vazão máxima, do seu tempo de ocorrência e do volume de escoamento superficial.

## ABSTRACT

SILVA, José Márcio Alves da, M.S., Universidade Federal de Viçosa, April 1999.  
**Methodology obtaining hydrographic of superficial flow along a slope.** Adviser:  
Fernando Falco Pruski. Committee Members: Demetrius David da Silva and Maria  
Lúcia Calijuri.

There was developed a methodology which allows to obtain the hydrographic of superficial flow and the maxim outlet to any position along a slope and to all the transversal sections of the terrace canals and superficial drains. The area of the slope was divided in a matrix system having 100 lines and 100 columns. There was considered that the outlet occurs in the direction of the slope's declivity and the outlet of each pixel is the addition between its outlet and the one produced in the other pixels which contribute to the superficial flow in the pixel under analysis. In the canal, the outlet was taken as the addition of the outlets from the columns in the reticular system. There was developed a software using Delphi as a programming language in order to apply this methodology. As results, the softer provides the hydrographic of the superficial flow to any position along the slope and to the transversal sections of the terrace canal or superficial drain, beyond the maxim outlet, its time of occurrence and the volume of the superficial flow.

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da década de 70 e mais acentuadamente nos anos 80, houve um despertar para as ameaças a que estava sujeita a humanidade, caso não houvesse mudança de comportamento quanto ao uso dos recursos hídricos. Essa disposição encontrou eco em diversos segmentos da sociedade organizada, e um dos resultados mais expressivos foi a elaboração de instrumentos legais que regem o assunto, como a Lei Nº 9.433, de 08.01.1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, que vem colocando em prática o gerenciamento do setor. Um dos princípios básicos da nova legislação é a gestão integrada dos recursos hídricos, adotando-se a bacia hidrográfica como a unidade de planejamento, em consonância com a realidade pedogeológica que a compõe. Nesse ponto, fica claro que a gestão do solo e a da água são indissociáveis, pois sem a conservação do solo não há conservação da água (AÇÃO AMBIENTAL, 1998).

Dentre os problemas ocasionados pela má gestão dos recursos hídricos, citam-se a poluição dos mananciais, acarretando aumento de custo no tratamento da água; a disseminação de doenças transmissíveis por veiculação hídrica; o uso indevido e indiscriminado da água, gerando atritos entre os seus múltiplos usos; e o assoreamento dos cursos d'água, causando diminuição do volume destes e favorecendo a ocorrência de enchentes. Destes problemas, alguns estão intimamente ligados à erosão hídrica (processo de desprendimento, arraste e

deposição das partículas do solo pela ação da água que escoam sobre a superfície do terreno).

A estimativa de vazões máximas de escoamento superficial é frequentemente necessária, tanto em bacias hidrográficas com ocupação agrícola quanto naquelas com ocupação urbana (BONTA e RAO, 1992). O dimensionamento de drenos, barragens e obras de proteção contra cheias e erosão hídrica requer o estudo das precipitações intensas, para obtenção da altura da chuva de projeto, com a qual é definida a vazão a ser utilizada. 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 a água, o conhecimento do volume escoado é suficiente. Por outro lado, se há necessidade da condução do excesso de água para fora da área de interesse, a determinação da vazão de escoamento superficial torna-se mais importante, particularmente a vazão correspondente a um determinado período de retorno (SCHWAB et al., 1966).

Estudo realizado pelo "Water Resources Council", citado por BONTA e RAO (1992), documenta a dificuldade de aplicar os procedimentos para estimativa da vazão máxima de escoamento superficial, em razão da imprecisão de alguns dos métodos costumeiramente usados e da grande subjetividade nessas estimativas. Em vista do exposto, a investigação de um método que produza estimativas confiáveis de vazão máxima de escoamento superficial torna-se fundamental para que se possa fazer um correto dimensionamento de obra hidráulica.

A precipitação é o fator fundamental no processo de ocorrência da erosão hídrica. Frequentemente, solos férteis usados na produção agrícola estão ameaçados pela erosão. Sedimentos movidos pelo escoamento superficial, como fertilizantes e pesticidas, podem causar sérios danos aos cursos d'água. A utilização de ferramentas que possibilitem a simulação do escoamento superficial é uma forma prática de obter estimativas deste. Existem, atualmente, softwares capazes de realizar este trabalho; no entanto, o seu alto custo e a sua dificuldade de manipulação dificultam a sua utilização.

Assim, objetivou-se, com este trabalho, o desenvolvimento de uma metodologia que permita obter o hidrograma de escoamento superficial decorrente da precipitação para qualquer pixel ao longo de uma encosta (com declividade num único sentido) e para seções transversais do canal de terraços ou drenos de superfície. Pretendeu-se, também, desenvolver um software que, utilizando a metodologia desenvolvida, possibilitasse o traçado do hidrograma de escoamento superficial para a encosta e para canais de terraços ou drenos de superfície.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. O ciclo hidrológico**

De acordo com GOLDENFUM e TUCCI (1998), o ciclo hidrológico (Figura 1) é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado principalmente pela energia solar, associada à gravidade e à rotação terrestre. É o elemento fundamental da hidrologia, representando a água em fases distintas e independentes, desde a ocorrência de precipitações até seu retorno à atmosfera sob a forma de vapor.

Pode-se considerar que toda a água utilizável pelo homem provém da atmosfera. A atmosfera pode ser visualizada como um vasto reservatório potencial de água e um sistema de transporte e distribuição do vapor d'água. Todas as transformações aí realizadas o são à custa da energia recebida do sol. A água pode ser encontrada na atmosfera sob a forma de vapor, partículas líquidas, gelo ou neve. Quando as gotículas de água, formadas pela condensação do vapor, atingem uma determinada dimensão, são encaminhadas, por ação gravitacional, para a superfície terrestre, formando a precipitação.

Parte da precipitação não atinge o solo, seja devido à evaporação durante a própria queda, seja porque fica retida pela vegetação, num processo denominado interceptação pela cobertura vegetal. Parte do volume que atinge o

solo se infiltra, parte escoá sobre a superfície e parte evapora, quer diretamente, quer através das plantas.

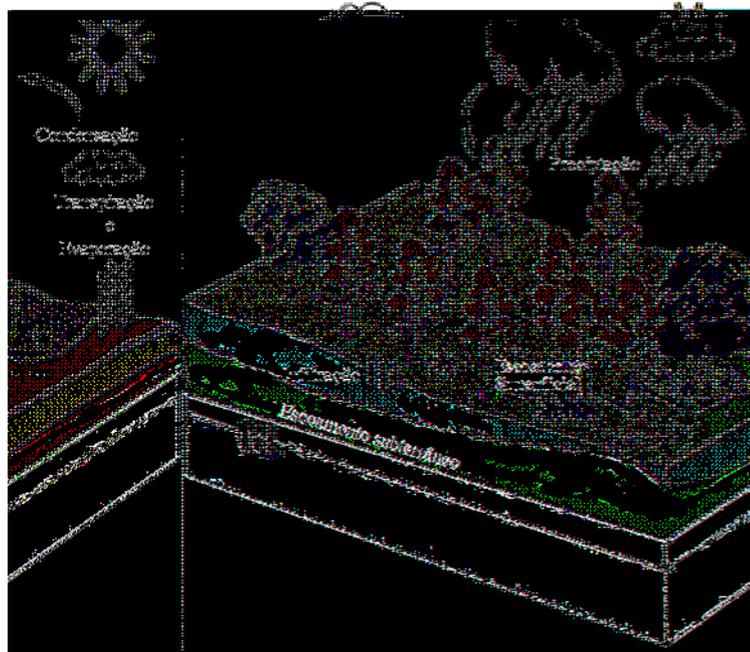


Figura 1 - Esquema representativo das fases do ciclo hidrológico.

A infiltração é o processo de penetração da água no solo. Quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, a água escoá superficialmente. Inicialmente são preenchidas as depressões do terreno (retenção superficial) e em seguida começa o escoamento propriamente dito, com a água procurando os canais naturais, que vão se concentrando nos vales principais e formando os cursos dos rios, para finalmente dirigirem-se aos lagos, mares e oceanos. Nesse processo pode ocorrer infiltração ou evaporação, em função das características do terreno e da umidade atmosférica. A água retida nas depressões ou como umidade superficial do solo pode ainda se infiltrar ou evaporar.

A água que infiltra no solo movimentá-se através do espaço poroso existente no solo por percolação e, eventualmente, atinge uma zona totalmente saturada, formando o lençol freático. O lençol freático poderá interceptar uma

vertente, retornando à superfície, alimentando rios ou mesmo os próprios oceanos, ou poderá ser formado entre camadas impermeáveis, constituindo os lençóis artesianos.

A umidade do solo, realimentada pela infiltração, é aproveitada em parte pelos vegetais, que a absorvem pelas raízes, devolvendo uma grande parcela à atmosfera, na forma de vapor, por transpiração.

Em qualquer tempo e local por onde circula a água na superfície terrestre, seja nos continentes ou nos oceanos, há evaporação para a atmosfera, fenômeno que fecha o ciclo hidrológico. Em muitos estudos, a evaporação do solo e das plantas é considerada em conjunto, sob a denominação de evapotranspiração.

Durante as diferentes fases do ciclo hidrológico, três tipos de escoamento podem ocorrer:

- a) escoamento superficial: a água excedente sobre a superfície do solo é impulsionada pela gravidade para as cotas mais baixas, quando é capaz de vencer o atrito com a superfície do solo;
- b) escoamento subsuperficial ou hipodérmico: é o escoamento que se processa nas primeiras camadas do solo, após a infiltração da água da chuva, no sentido das cotas mais baixas do meio poroso; e
- c) escoamento subterrâneo ou de base: é o escoamento que ocorre nos aquíferos em direção aos rios e mares, sendo responsável pelo abastecimento dos cursos d'água em épocas de estiagem.

## **2.2. Escoamento superficial**

Do volume total precipitado, uma parte é interceptada pela vegetação, enquanto o restante atinge a superfície do solo, provocando o umedecimento dos agregados do solo e reduzindo suas forças coesivas. Com a continuidade da ação das chuvas, ocorre a desintegração dos agregados em partículas menores. A quantidade de solo desestruturado aumenta com a intensidade da precipitação, a

velocidade e o tamanho das gotas. Além de ocasionar a liberação de partículas, que obstruem os poros do solo, o impacto das gotas tende também a compactar esse solo, ocasionando o selamento de sua superfície (PRUSKI, 1997). Segundo ZHANG et al. (1998), o selamento superficial é comum em muitos solos agrícolas, causando aumento do escoamento superficial e da erosão dos solos. O selamento superficial reduz substancialmente a infiltração da água, devido à sua baixa condutividade hidráulica.

O empoçamento da água, nas depressões existentes na superfície do solo, começa a ocorrer somente quando a intensidade de precipitação excede a velocidade de infiltração, ou quando a capacidade de armazenamento de água no solo for ultrapassada. Esgotada a capacidade de retenção superficial, a água começará a escoar. Associado ao escoamento superficial, ocorre o transporte de partículas do solo, que sofrem deposição somente quando a velocidade do escoamento superficial for reduzida. Portanto, se a intensidade da precipitação, excluindo a interceptação e as perdas por evaporação, for menor que a taxa de infiltração, toda a água precipitada infiltrará no solo. Inversamente, quando a intensidade da precipitação for maior do que a taxa de infiltração, uma seqüência de eventos ocorrerá, produzindo escoamento superficial (GRAY, 1973).

Segundo SILVEIRA et al. (1993), a partir do início da precipitação, o solo começa a aumentar seu teor de umidade e, conseqüentemente, a capacidade de infiltração diminui. Quando a intensidade de precipitação é menor que a capacidade de infiltração, o processo de infiltração é determinado pela intensidade de precipitação e, conseqüentemente, a velocidade de infiltração é igual à própria intensidade de precipitação. Com a continuidade da precipitação, a velocidade de infiltração pode igualar-se à capacidade de infiltração, que deve continuar decrescendo. A partir deste instante, inicia-se o escoamento superficial. Terminada a chuva, o solo começa a perder umidade por evaporação, absorção pelas plantas, escoamento subsuperficial e subterrâneo, enquanto a capacidade de infiltração começa a aumentar, até que outra precipitação ocorra e o processo se repita.

De acordo com McMILLAN e BURGY (1960), a interceptação pode ser definida como o processo de retenção da precipitação pela vegetação. Segundo estes autores, muitos termos têm sido usados para se referir aos vários componentes deste processo. Os termos interceptação e perdas por interceptação têm sido largamente usados para exprimir o total de precipitação que deixa de atingir a superfície do solo em virtude da sua retenção pelo dossel das plantas. O termo interceptação armazenada tem sido usado para expressar a quantidade de água que permanece na vegetação quando a precipitação cessa.

A água da precipitação retida em poças, diques e outras depressões da superfície do solo é chamada de armazenamento superficial. Essas depressões variam largamente em área e profundidade; suas dimensões dependem consideravelmente das características da depressão. Tão logo a intensidade da chuva exceda a capacidade de infiltração, o excesso de chuva começa a encher estas depressões da superfície. Cada depressão tem sua própria capacidade de armazenamento; quando esta capacidade é preenchida, a água que entra na depressão é compensada pela que sai. Depressões de vários tamanhos podem ser superpostas e interconectadas. Quase que imediatamente após o excesso de chuva ter início, as depressões menores são preenchidas e o escoamento superficial se inicia. A maioria da água circundante enche as depressões maiores, embora uma parcela possa seguir em direção ao canal do curso d'água. A ocorrência contínua desses eventos, com porções sucessivamente maiores do escoamento superficial, contribui para a formação dos riachos. A água retida nas depressões ao fim da chuva é evaporada ou absorvida pelo solo por meio da infiltração.

Devido à dificuldade em quantificar a interceptação pela cobertura vegetal e o armazenamento superficial, o Soil Conservation Service (SCS), atualmente conhecido como Natural Resource Conservation Service (NRCS) do United States Department of Agriculture (USDA), propôs, por intermédio da metodologia caracterizada como Curve Number (Número da Curva), um termo utilizado para estimar esses componentes, o qual é designado abstrações iniciais, caracterizando toda a precipitação que ocorre antes do início do escoamento superficial (SIMANTON et al., 1996).

Segundo PRUSKI e SILVA (1997), o escoamento superficial é influenciado por dois tipos de parâmetros: os agroclimáticos e os 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 maiores a área e a declividade da bacia, tanto maior deverá ser a vazão máxima de escoamento superficial;
- b) condições de superfície - decorrentes do tipo de solo, da topografia e da rede de drenagem;
- c) tipo de solo - interfere diretamente na velocidade de infiltração da água no solo e na capacidade de retenção da água sobre sua superfície;
- d) topografia - além de influenciar a velocidade de escoamento da água no solo, interfere também na capacidade de armazenamento de água sobre este, e as áreas mais declivosas geralmente apresentam menor capacidade de armazenamento superficial do que as áreas mais planas;
- e) rede de drenagem - a existência de rede de drenagem permite a rápida concentração do escoamento, favorecendo, conseqüentemente, a ocorrência de elevadas vazões de escoamento superficial; e

- f) obras hidráulicas presentes na bacia - enquanto as obras destinadas à drenagem promovem o aumento da velocidade de escoamento da água na bacia e, conseqüentemente, uma concentração mais rápida do escoamento superficial, produzindo o aumento da vazão resultante, as obras destinadas à contenção do escoamento superficial resultam em redução da velocidade de escoamento.

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 ao planejamento de irrigação suplementar (PATHAK et al., 1989). Entretanto, no dimensionamento de obras hidráulicas, o conhecimento da vazão máxima torna-se fundamental.

Em bacias hidrográficas desprovidas de instrumentação, a determinação do escoamento superficial é mais difícil e menos precisa do que em bacias instrumentadas (CASTRO FILHO e BISCAIA, 1981). Dentre os métodos para estimar as vazões máximas decorrentes do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica, destacam-se: o método racional, o método de Cook, o hidrograma unitário e a fórmula de Mac Math. Dentre os métodos para calcular o volume total escoado superficialmente, destacam-se o do balanço hídrico diário e o do Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos (Método do Número da Curva). Em ambos os métodos, o conhecimento da chuva de projeto e da capacidade de infiltração da água no solo é requerido (PRUSKI et al., 1997).

O método mais simples é o racional, que estima a vazão máxima de escoamento de determinada área, sujeita a uma intensidade máxima de precipitação correspondente a determinado tempo de concentração. Segundo Harold et al., citados por CASTRO FILHO e BISCAIA (1981), o método racional pode ser recomendado para uso em pequenas bacias, com as seguintes restrições: toda a bacia deverá contribuir com enxurrada ao ponto de escoamento, simultaneamente e em intervalos de tempo pequenos; as precipitações deverão ser de alta intensidade e de curta duração; e a variação da velocidade de infiltração não deverá ser grande em pequenos intervalos de tempo.

O método racional é expresso pela equação

$$Q = \frac{C i_m A}{360} \quad (1)$$

em que

Q = vazão máxima de escoamento,  $m^3 s^{-1}$ ;

C = coeficiente de escoamento, adimensional;

$i_m$  = intensidade máxima média de precipitação,  $mm h^{-1}$ ; e

A = área da bacia de contribuição, ha.

De acordo com SMEDEMA e RYCROFT (1983), o método racional foi originalmente desenvolvido para estimar vazões máximas de escoamento em pequenas bacias urbanas, cuja proporção de área impermeável é grande. A aplicação do método racional para áreas agrícolas é mais apropriada em bacias que não excedam 200 ha. No entanto, existem divergências, na literatura, com respeito à área da bacia de contribuição para a qual deve ser aplicado o método. DAKER (1970) recomenda a sua aplicação em bacias de até 500 ha; MILLAR (1988) propõe o uso em bacias de 100 a 200 ha; e FENDRICH (1984) aconselha a sua utilização em áreas de até 50 ha.

O método racional é um dos procedimentos mais antigos para a predição do escoamento superficial, sendo ainda usado em muitas situações. Uma das dificuldades de aplicação do método racional, entretanto, é a estimativa do tempo de concentração (GREGORY, 1982).

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 (PATHAK et al., 1989; RAWLS et al., 1980; RAWLS e BRAKENSIEK, 1986). O método do número da curva foi desenvolvido para prever o escoamento superficial em pequenas bacias hidrográficas e somente pode ser usado onde dados relativos às características da bacia e registros diários de precipitação estão disponíveis. O método foi desenvolvido a partir de dados oriundos de áreas experimentais com solos agrícolas (WELLS et al., 1986).

A principal vantagem do método do número da curva é que ele requer poucos parâmetros de entrada, os quais são de fácil obtenção (PATHAK et al., 1989). O método do número da curva foi desenvolvido para ser utilizado em bacias sem instrumentação, baseando-se em dados de chuvas (precipitação total diária) e de bacias hidrográficas. Desse modo, a intensidade da precipitação não é considerada de forma explícita (USDA-SCS, 1985; KRAIJENHOFF VAN DE LEUR, 1983; RAWLS et al., 1980).

Na fase inicial de uma precipitação não se produz escoamento superficial. Essa componente da precipitação total é representada no método do número da curva por  $I_a$  (abstrações iniciais) (BELTRAN et al., 1988). O termo  $I_a$  é definido como a precipitação acumulada até o início do escoamento superficial, sendo função da interceptação pela cobertura vegetal, do armazenamento em depressões e da infiltração antes do início do escoamento (ROJAS, 1984; USDA-SCS, 1985).

Diversos autores, citados por 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 de água no solo podem resultar em uma mudança súbita no número da curva, o que pode acarretar variação irreal no valor do escoamento superficial calculado.

### **2.3. Conseqüências do escoamento superficial**

O processo de separação, transporte e deposição das partículas do solo em virtude da ação da água sobre as partículas do solo é conhecido como erosão hídrica, decorrente da ação da chuva.

Segundo LAL (1994), a erosão acelerada do solo é um sério problema global e extremamente reconhecido. Para este autor, o que é difícil avaliar

fidedigna e precisamente são as dimensões – a extensão, magnitude e taxa – da erosão do solo e suas conseqüências econômicas e ambientais. Odelman et al., citados por YU et al. (1998), comentam que aproximadamente dois bilhões de hectares, quase 13% da superfície terrestre, têm sofrido algum tipo de degradação induzida pelo homem, sendo a erosão hídrica a principal causa desta degradação. Segundo Stocking, citado por YU et al. (1998), diversos experimentos têm sido realizados em vários países do mundo para quantificar as perdas de água e solo em áreas agrícolas, a fim de avaliar o efeito de tecnologias de conservação de solos e práticas de manejo de culturas no controle da erosão hídrica.

Além das partículas de solo em suspensão, o escoamento superficial transporta nutrientes, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas que, além de causarem prejuízos diretos à produção agropecuária, também causam poluição dos cursos d'água. Assim, as perdas por erosão tendem a elevar os custos de produção, aumentando a necessidade do uso de corretivos e fertilizantes e reduzindo o rendimento operacional das máquinas agrícolas. A erosão causa também problemas à qualidade e disponibilidade de água, decorrentes da poluição e assoreamento dos mananciais, favorecendo a ocorrência de enchentes no período chuvoso e aumentando a escassez de água no período de estiagem (PRUSKI, 1997). Para diminuir ou reverter os impactos negativos da erosão do solo, os projetistas precisam utilizar medidas adequadas para o controle da erosão (LINDLEY et al., 1998).

O processo erosivo decorrente do escoamento superficial promove problemas também em cursos e reservatórios d'água, como: redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios devido à sedimentação das partículas transportadas, o que acarreta aumento do custo de construção das barragens; redução do potencial de geração de energia elétrica, em conseqüência da diminuição da capacidade de acumulação de água nos reservatórios; elevação dos custos de tratamento da água; desequilíbrio do balanço de oxigênio dissolvido na água e prejuízos para o crescimento de espécies aquáticas, em função da turbidez da água e da conseqüente redução na capacidade de

propagação da luz; e aumento dos custos de dragagem dos cursos e reservatórios d'água (BARROSO e SILVA, 1992).

Por ser uma das piores conseqüências da erosão para as comunidades, em vista dos prejuízos que proporciona à produção de energia elétrica e à disponibilidade de água para consumo humano, animal e irrigação, o assoreamento de represas tem sido motivo de grande preocupação dos projetistas de obras hidráulicas. Toda e qualquer ação preventiva contra o assoreamento de reservatórios que não contemplan medidas de conservação do solo e da água na bacia de captação estará condenada ao fracasso. Além disso, para o sucesso dessas ações, é necessário que elas sejam estendidas para toda a microbacia, uma vez que, se forem localizadas, surtirão pequeno efeito (COSTA e MATOS, 1997).

O manejo adequado da água, buscando reduzir o escoamento superficial por meio do aumento da infiltração de água no solo, bem como o conseqüente reabastecimento do lençol freático, representa uma prática fundamental para melhorar o aproveitamento das águas de chuvas, minimizando os picos de vazões e reduzindo o déficit de água nos períodos de estiagem.

#### **2.4. A utilização de sistemas de informações geográficas**

Um sistema de informações geográficas é um sistema auxiliado por computador para adquirir, armazenar, analisar e exibir dados geográficos. Hoje, muitos softwares estão disponíveis para ajudar nesta atividade (EASTMAN, 1995).

A utilização de técnicas de geoprocessamento constitui-se em instrumento de grande potencial para o estabelecimento de planos integrados de conservação do solo e da água. Nesse contexto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) se inserem como uma ferramenta capaz de manipular as funções que representam os processos ambientais em diversas regiões de uma forma simples e eficiente, permitindo economia de recursos e tempo. Estas

manipulações permitem agregar dados de diferentes fontes (por exemplo: imagens de satélite, mapas topográficos, mapas de solos, etc.) e diferentes escalas. O resultado destas manipulações, geralmente, é apresentado sob a forma de mapas temáticos com as informações desejadas (MENDES, 1997).

A caracterização e a quantificação das interações entre os componentes do balanço hídrico são essenciais para o adequado planejamento dos recursos hídricos de uma bacia (SHERIDAM, 1997). O desenvolvimento de novas metodologias deve levar em conta três aspectos particulares no campo da hidrologia. Primeiro, o conhecimento dos complexos processos físicos envolvidos não é completo. Segundo, existe uma crescente demanda por modelos de escoamento superficial práticos e eficazes que permitam trabalhar nas áreas de proteção ambiental, recursos hídricos e em campos relacionados. Finalmente, nestes últimos anos, tem-se visto o aparecimento de novos programas computacionais que trabalham com dados espaciais e de computadores mais velozes capazes de executá-los (ZOLLWEG et al., 1996).

Modelos hidrológicos lidam com fenômenos contínuos e dinâmicos, enquanto os SIGs disponíveis atualmente no mercado tratam apenas de dados estáticos e discretos. Para representar a “realidade”, o SIG utiliza os conceitos de pontos, linhas, polígonos, grades, redes de triângulos irregulares, etc. Na hidrologia, os sistemas a serem representados espacialmente são bacias, aquíferos, rios, lagos, estuários, etc. No campo conceitual, a análise de fenômenos é feita no SIG através da manipulação e interpretação de dados geográficos. Na hidrologia, esta análise é feita através da simulação do movimento da água e de seus constituintes, usando equações que representam leis físicas. É fundamental que os técnicos envolvidos com recursos hídricos reconheçam esse problema e entendam as suposições e limitações da representação discreta da “realidade” (manipulada através do SIG) e o uso destes dados em modelos (MENDES, 1997).

Segundo BINGNER et al. (1997), a capacidade de um modelo simular os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica depende de como estes

processos estão representados pelo modelo e de que maneira ela é fornecida como um parâmetro de entrada no modelo. Muitos modelos de erosão requerem que a bacia seja dividida em pequenas áreas ou sub-bacias. Cada sub-bacia é assumida como homogênea com parâmetros representativos de toda a sub-bacia. Contudo, o tamanho da sub-bacia afeta a homogeneidade. A redução do tamanho e o aumento do número de sub-bacias afetam os resultados de uma simulação de escoamento superficial e transporte de sedimentos. Entretanto, um número alto de sub-bacias também aumenta o trabalho de preparação dos dados de entrada e das operações computacionais.

A avaliação e o controle da contaminação hídrica por compostos químicos devido ao escoamento superficial requerem predições precisas do volume de escoamento oriundo dos locais nos quais aqueles compostos químicos são aplicados. Medições do escoamento superficial no campo são caras e demandam tempo, e isto tem motivado o desenvolvimento e uso de modelos matemáticos para predizer o escoamento superficial (MA et al., 1998).

O uso confiável de modelos hidrológicos requer dados representativos e precisos. Entretanto, a coleta, o armazenamento e a manipulação dos dados requeridos pelos modelos podem ser ineficientes, por três razões: grande variabilidade apresentada pelos dados hidrológicos, grande volume de dados requerido no processamento e necessidade de adequada organização dos dados. Por outro lado, usando-se um SIG, tais dados podem ser compilados e processados com relativa facilidade, representando, portanto, efetivo potencial de uso integrado a modelos hidrológicos. As características físicas da bacia hidrográfica, como tipo e uso do solo e topografia, apresentam grande variação espacial. Em modelos que levem em conta a variabilidade espacial (ditos modelos distribuídos), estas características podem ser consideradas diretamente (CALIJURI et al., 1998).

### **3. METODOLOGIA**

Desenvolveu-se metodologia que permite obter o hidrograma de escoamento superficial decorrente da precipitação para qualquer pixel ao longo de uma encosta (com declividade num único sentido) e no canal do terraço ou dreno natural pelo qual é feita a drenagem do escoamento superficial que ocorre na área considerada. Para aplicação da metodologia, desenvolveu-se também um software, em linguagem de programação Delphi, que permite, uma vez definidas as condições típicas da área de interesse, a obtenção do hidrograma de escoamento superficial.

O software utiliza um banco de dados que contém informações relativas às condições da encosta, como declividade do terreno, classe, uso e manejo do solo e velocidade de infiltração básica da água no solo (VIB). Considerando que um banco de dados é uma coleção de mapas e informações associadas na forma digital e que se propõe a descrever as características da superfície terrestre, ele pode ser visto pela união de dois elementos: um conjunto de informações espaciais descrevendo o relevo da superfície terrestre e outro de atributos descrevendo as características desta superfície (EASTMAN, 1995).

### 3.1. Geração do banco de dados

A geração do banco de dados foi realizada utilizando o Sistema de Informações Geográficas Idrisi for Windows versão 1.0 e consistiu na conversão de mapas temáticos, referentes a topografia, classe, uso e manejo do solo, impressos em folhas de papel, para a forma digital, possibilitando a sua utilização pelo software. Os passos e comandos utilizados para a obtenção deste banco de dados são apresentados na Figura 2 e descritos na seqüência.

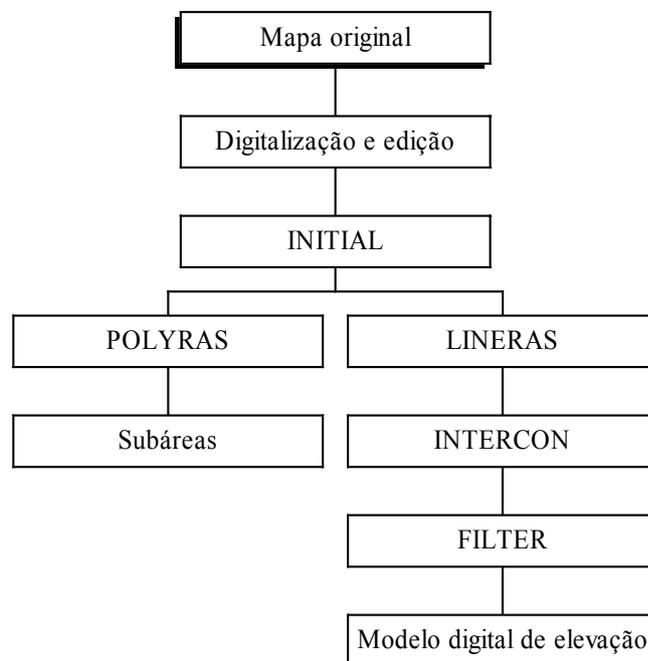


Figura 2 – Fluxograma para obtenção das imagens digitais utilizadas pelo software.

#### 3.1.1. Divisão do mapa para digitalização

A delimitação da encosta e das subáreas referentes a classe, uso e manejo do solo foi feita manualmente no mapa impresso, identificando-se assim a área de interesse e as subáreas que possuíam características distintas de rugosidade e

velocidade de infiltração básica da água no solo. Nesta fase, foram definidas as coordenadas máximas e mínimas dos eixos X e Y. Estes valores são necessários quando da digitalização das feições.

### **3.1.2. Digitalização e edição do relevo e das características da encosta**

A digitalização do relevo, das características de rugosidade e da VIB da encosta foi realizada utilizando o módulo Tosca e uma mesa digitalizadora. Após a digitalização, procedeu-se à edição dos vetores, objetivando a correção de erros cometidos durante a mesma.

O relevo foi digitalizado na forma de linhas, sendo o identificador a cota de cada curva de nível. As características de rugosidade e VIB da encosta foram digitalizadas na forma de polígonos. O identificador de cada um foi o valor do parâmetro correspondente à subárea digitalizada.

### **3.1.3. Geração das imagens utilizadas pelo software**

Para a geração das imagens utilizadas pelo software, procedeu-se à rasterização dos vetores gerados no item anterior. A rasterização consiste na criação de arquivos matriciais, onde cada célula ou pixel armazena um valor numérico, representando a característica do ponto. Na Figura 3 visualiza-se a representação de arquivos do tipo raster. Utilizou-se o Sistema de Informações Geográficas Idrisi for Windows 1.0 para realizar a rasterização.

O primeiro passo para a geração das imagens é a criação de imagens iniciais com o comando INITIAL do Idrisi, que gera imagens nas quais todas as células possuem o mesmo atributo. Com este comando foram geradas imagens com todas as células possuindo o valor zero.

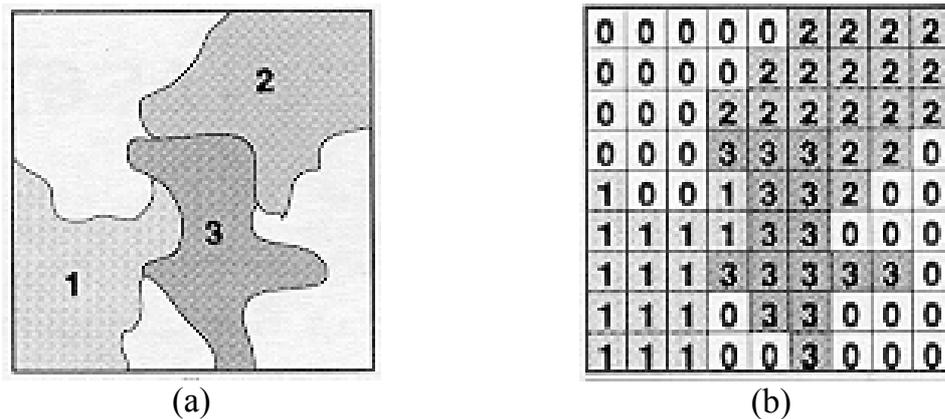


Figura 3 – Representação de subáreas em mapas (a) e no formato matricial ou raster (b).

### 3.1.3.1. Geração da imagem de elevação

Após a geração das imagens iniciais, utilizou-se o comando LINERAS do Idrisi para converter o arquivo vetorial das curvas de nível para o equivalente no formato raster. Neste processo de conversão, uma imagem inicial foi atualizada com os valores de atributo das linhas do vetor.

Realizada a rasterização, procedeu-se à interpolação com o comando INTERCON, gerando assim um modelo digital de elevação do terreno (MDE), contendo as cotas para qualquer ponto da imagem. No entanto, a imagem obtida contém imperfeições devidas à interpolação utilizada, como pode ser visualizado na Figura 4a. Com o intuito de minimizar estas imperfeições, utilizou-se o comando FILTER, que tem por objetivo tornar as linhas de mesma cota contínuas ao longo da imagem. Na Figura 4b é apresentada a imagem obtida após a utilização de um filtro de média.

### 3.1.3.2. Geração das imagens das subáreas contendo características distintas de rugosidade e da VIB

Tendo gerado as imagens iniciais, utilizou-se o comando POLYRAS do Idrisi para converter polígonos vetoriais para a representação raster, gerando

imagens raster correspondentes às subáreas. O valor interno de cada polígono, no formato raster, permaneceu com os respectivos valores de atributo dos polígonos do formato vetorial.

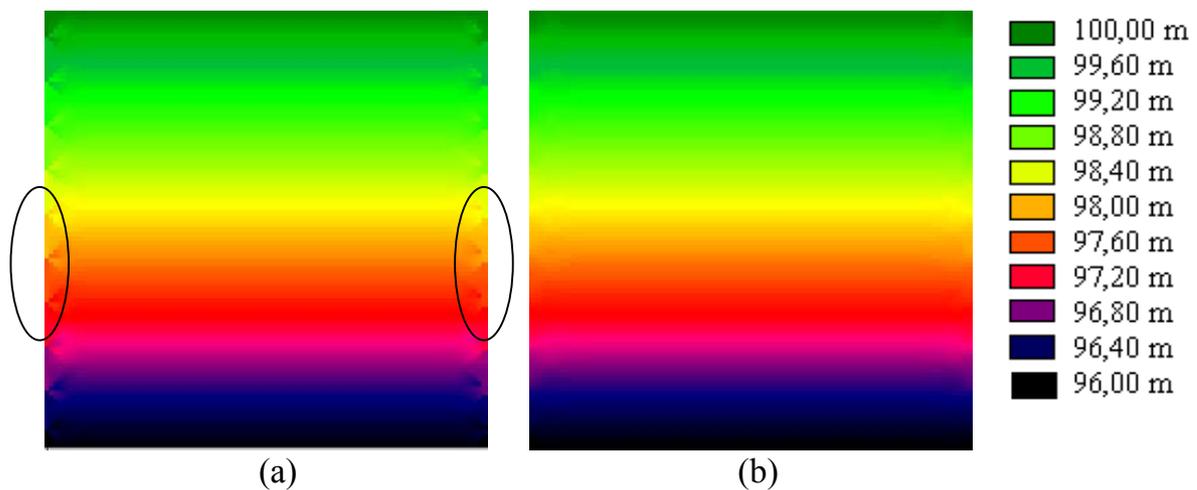


Figura 4 – Modelos digitais de elevação obtidos pela interpolação: antes (a) e após (b) a utilização de um filtro de média.

### 3.2. Obtenção do hidrograma de escoamento superficial para qualquer local de uma encosta

Utilizou-se o Sistema de Informações Geográficas Idrisi for Windows 1.0 para subdividir a encosta num sistema matricial composto por 100 linhas e 100 colunas. Cada pixel deste sistema matricial possui uma posição identificada pela linha e coluna nas quais se encontra. Na Figura 5, visualizam-se uma subdivisão de uma área, composta por 10 linhas e 10 colunas, e o canal do terraço ou dreno de superfície.

A análise do hidrograma foi feita para a encosta e para o canal em separado (Figura 6).

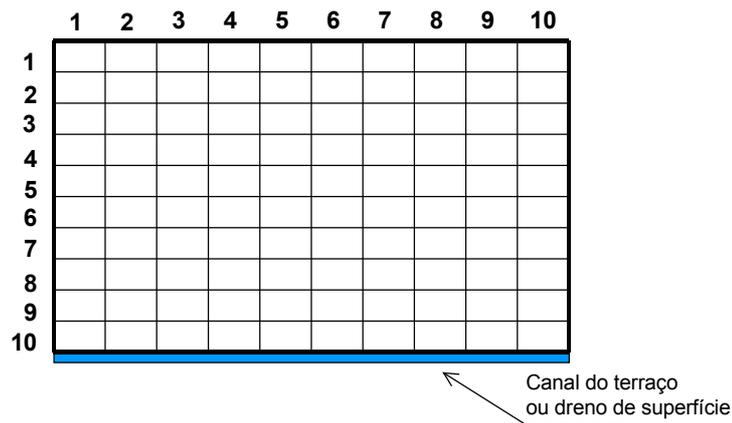


Figura 5 – Representação da subdivisão de uma área num sistema matricial composto por 10 linhas e 10 colunas.

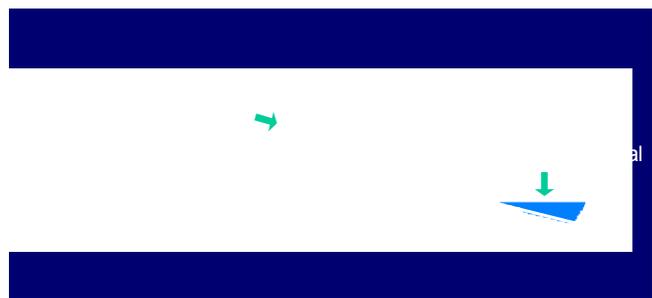


Figura 6 – Representação da encosta, com declividade num único sentido, e do canal do terraço ou dreno de superfície.

O hidrograma de escoamento superficial é uma representação gráfica da variação da vazão do escoamento superficial com o tempo. Para o traçado deste, partiu-se do princípio de que a vazão aumenta até o momento em que a contribuição advinda do pixel mais remoto atinge o pixel considerado. A partir de então, a vazão decresce com o tempo. Caso o tempo de duração da precipitação seja maior que o tempo de deslocamento, o hidrograma possuirá um trecho de valor constante e igual à vazão máxima, durante um tempo dado pela diferença entre a duração da precipitação e o tempo de deslocamento. Dessa

forma, são identificados dois trechos distintos no traçado do hidrograma de escoamento superficial (Figura 7):

- a) trecho ascendente: há um crescimento da vazão com o tempo, em virtude do aumento da área de contribuição para o escoamento superficial até a célula considerada; e
- b) trecho descendente: a vazão decresce com o tempo, começando no momento que a água advinda da célula mais remota atinge a célula considerada.

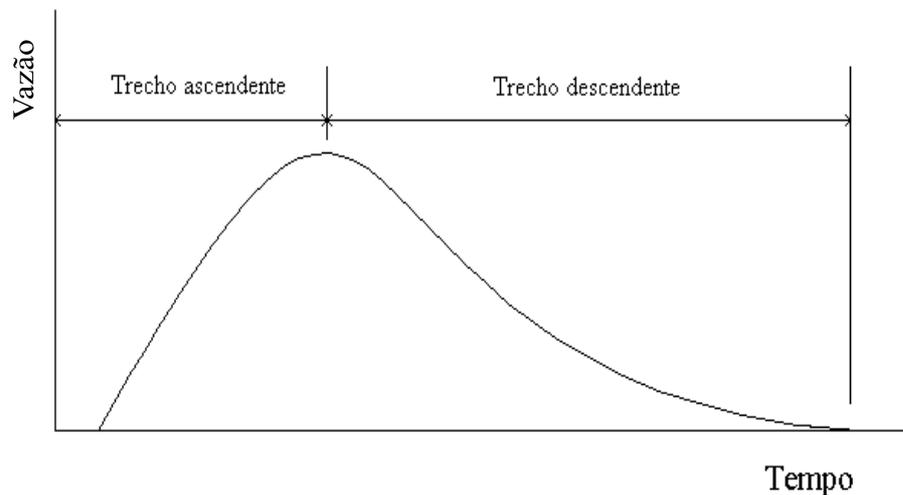


Figura 7 - Representação esquemática do hidrograma de escoamento superficial.

Para o desenvolvimento do modelo, foram estabelecidas as seguintes premissas:

- a precipitação é uniforme na área analisada e a equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação é conhecida;
- solo com umidade próxima à saturação: quando da ocorrência da chuva de projeto, considerou-se que o solo encontrava-se na sua capacidade de campo e a velocidade de infiltração da água aproximava-se da velocidade de infiltração básica da água no solo (VIB);

- a evaporação foi nula durante a precipitação, visto tratar-se de precipitações intensas e a umidade do ar ser alta durante a ocorrência da chuva; e
- a velocidade de infiltração da água no canal foi considerada constante durante a acumulação de água neste.

A utilização de um sistema de informações geográficas permite a análise do comportamento em qualquer pixel de uma imagem raster. Assim, o hidrograma de escoamento superficial pode ser traçado para qualquer pixel da encosta ou de canais de terraços ou drenos de superfície. A análise do hidrograma de escoamento superficial foi feita para duas condições: escoamento sobre a superfície do terreno (seguindo a direção do declive) e escoamento concentrado no canal.

### **3.2.1. Obtenção do hidrograma de escoamento superficial para qualquer pixel ao longo da encosta**

Para esta condição foi considerado que o escoamento superficial ocorre exclusivamente na direção da linha de maior declividade do terreno e aumenta até que a contribuição advinda da linha 1 atinja a linha considerada. Após esse tempo, o escoamento decresce com o tempo.

O escoamento superficial só se inicia após o preenchimento das abstrações iniciais ( $I_a$ ). As abstrações iniciais (precipitação ocorrida até o início do escoamento superficial) dependem da interceptação pela cobertura vegetal, do armazenamento em depressões do solo e da infiltração que antecede o escoamento superficial. Os valores de  $I_a$  foram calculados por meio do método do número da curva, utilizando a equação recomendada pelo United State Department of Agriculture - Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1985), expressa como

$$I_a = 50,8 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2)$$

em que

$I_a$  = abstrações iniciais, mm; e

CN = número da curva, que define o complexo hidrológico solo-vegetação, adimensional.

Como a velocidade de infiltração aproxima-se da VIB, considerou-se que, quando a precipitação ocorre, a umidade do solo é a máxima definida pelo método do número da curva (AMC III), isto é, a precipitação acumulada durante os cinco dias anteriores à chuva estudada é igual ou maior que 52,5 mm.

O tempo correspondente à ocorrência de  $I_a$  é obtido por meio da equação

$$t_{I_a} = \frac{I_a \cdot 60}{i_m} \quad (3)$$

em que

$t_{I_a}$  = intervalo de tempo compreendido entre o início da chuva e o início do escoamento superficial, min; e

$i_m$  = intensidade máxima média de precipitação,  $\text{mm h}^{-1}$ .

Para a obtenção de  $i_m$  foi utilizada a equação de intensidade, duração e frequência da precipitação, cuja forma é

$$i_m = \frac{K T^a}{(t + b)^c} \quad (4)$$

em que

$K, a, b, c$  = parâmetros relacionados à estação pluviográfica;

$T$  = período de retorno, anos; e

$t$  = duração da precipitação, min.

Substituindo a equação 4 na equação 3, pode-se obter  $t_{I_a}$  pela equação

$$t_{la} = \frac{60 I_a}{\frac{K T^a}{(t_{la} + b)^c}} \quad (5)$$

Para a resolução desta equação foi utilizado o método de Newton-Raphson.

Para se quantificar a vazão que escoar para uma dada célula ao longo da encosta, para um determinado tempo  $t$ , procedeu-se ao somatório das vazões das células que contribuem com vazão para aquela célula, pela equação

$$q_t[i, j, t + t_d] = q_t[i - 1, j, t] + \frac{(i_i[i, j, t + t_d] - VIB) L EH}{3,6 \times 10^6 r n} \quad (6)$$

em que

$q_t[i, j, t + t_d]$  = vazão existente no pixel  $[i, j]$  para um tempo igual a  $t + t_d$ ,  $m^3 s^{-1}$ ;

$t_d[i, j, t]$  = tempo que a vazão que ocorre na linha  $i-1$  no tempo  $t$  leva para atingir a linha  $i$  para uma dada coluna  $j$ , min;

$q_t[i-1, j, t]$  = vazão existente no pixel  $[i-1, j]$  para um tempo igual a  $t$ ,  $m^3 s^{-1}$ ;

$i_i[i, j, t + t_d]$  = intensidade instantânea de precipitação no pixel  $[i, j]$  para o tempo  $t + t_d$ ,  $mm h^{-1}$ ;

VIB = velocidade de infiltração básica,  $mm h^{-1}$ ;

L = comprimento do terraço ou dreno de superfície, m;

EH = espaçamento horizontal entre os canais, m;

r = número de linhas; e

n = número de colunas.

A intensidade instantânea de precipitação, no instante  $t$ , é obtida pela equação

$$i_i = i_m \left(1 - \frac{c t}{t + b}\right) \quad (7)$$

em que  $i_i$  é a intensidade instantânea de precipitação, em  $\text{mm h}^{-1}$ .

Dentre as equações empíricas desenvolvidas para o estudo do escoamento em condutos livres, a equação de Manning é freqüentemente usada para descrever o escoamento na irrigação por superfície, condição na qual a profundidade de água é pequena (MAHESHWARI e McMAHON, 1992). Por esta razão, o cálculo do tempo de deslocamento foi feito utilizando a equação de Manning, sendo o  $t_d [i, j, t]$  obtido pela equação

$$t_d [i, j, t] = \frac{EH n_s}{S_t^{1/2} y_t [i-1, j, t]^{2/3} 60 r} \quad (8)$$

em que

$n_s$  = coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning para a superfície do solo,  $\text{s m}^{-1/3}$ ;

$S_t$  = declividade do terreno,  $\text{m m}^{-1}$ ; e

$y_t [i-1, j]$  = altura da lâmina d'água, para a linha  $i-1$  de uma dada coluna  $j$  no tempo  $t$ , m.

O valor de  $y_t [i-1, j]$  foi obtido pela equação

$$y_t [i-1, j, t] = \left( \frac{q_t [i-1, j, t] n_s}{S_t^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (9)$$

### 3.2.2. Obtenção do hidrograma de escoamento superficial concentrado no canal do terraço ou dreno de superfície

Para esta condição, o cálculo da vazão em uma seção do canal do terraço ou dreno de superfície foi realizado por meio da equação

$$q_c [j, t + t_{\text{can}}] = q_t [r, j, t + t_{\text{can}}] + q_t [r, j-1, t] \quad (10)$$

em que

- $q_c[j, t+t_{can}]$  = vazão no canal para a coluna j e tempo  $t+t_{can}$ ,  $m^3 s^{-1}$ ;  
 $t_{can}[i, j, t]$  = tempo que a vazão que ocorreu na coluna j-1 no tempo t  
 leva para atingir a coluna j, min;  
 $q_t[r, j, t+t_{can}]$  = vazão na última linha da coluna j no tempo  $t+t_{can}$ ,  $m^3 s^{-1}$ ;  
 $q_t[r, j-1, t]$  = vazão na última linha da coluna j-1 no tempo t,  $m^3 s^{-1}$ .

O tempo correspondente ao movimento da água e o valor de sua altura foram calculados utilizando a equação de Manning. O tempo que a vazão que ocorreu na coluna j-1 leva para atingir a coluna j, para um canal com seção triangular, foi determinado com a equação

$$t_{can}[j, t] = \frac{L n_c (2 S_t S_m (\sin(aa) + \sin(bb)))^{2/3}}{S_c^{1/2} (y_{can}[j-1, t] (S_t + S_m) \sin(aa) \sin(bb))^{2/3} 60 n} \quad (11)$$

em que

- $n_c$  = coeficiente de rugosidade de Manning para o canal,  $s m^{-1/3}$ ;  
 $S_t$  = declividade do terreno =  $\tan(bb)$ ,  $m m^{-1}$ ;  
 $S_m$  = declividade da parede de montante do canal =  $\tan(aa)$ ,  $m m^{-1}$ ;  
 $aa$  = inclinação da parede de montante do canal do terraço ou dreno de superfície, 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  
 $n$  = número de colunas.

A seção esquemática de um canal com seção transversal triangular é apresentada na Figura 8.

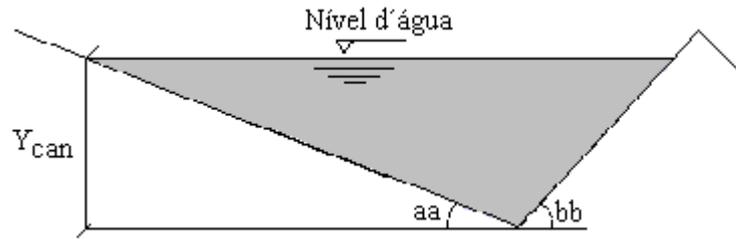


Figura 8 – Representação esquemática da seção transversal do canal do terraço ou dreno de superfície com formato triangular.

O valor da lâmina d'água acumulada na seção transversal do canal triangular foi calculado com a equação

$$y_{\text{can}}[j-1, t] = \left[ \frac{q_c[j-1, t] n_c (2 S_f S_s)^{5/3} (\text{sen}(aa) + \text{sen}(bb))^{2/3}}{S_c^{1/2} (S_s + S_f)^{5/3} (\text{sen}(aa) \text{sen}(bb))^{2/3}} \right]^{3/8} \quad (12)$$

em que  $q_c [j-1, t]$  é a vazão para a coluna  $j-1$  no tempo  $t$ ,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

### 3.2.3. Obtenção do 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 desta 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.

### 3.3. Desenvolvimento do software

O software foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Delphi 3.0. Segundo CANTÚ (1997), existem muitos ambientes de programação com os quais se pode trabalhar. A escolha do Delphi teve como justificativa a

facilidade de programação, o tratamento baseado em formulários, a programação orientada a objetos, seu compilador rápido, seu grande suporte a banco de dados, sua íntima integração com programação em Windows e sua tecnologia de componentes. Desde o seu lançamento, o Delphi tem sido aceito por várias equipes de programação.

### **3.3.1. Fluxograma de funcionamento do software**

O fluxograma de funcionamento do software é mostrado na Figura 9. Este fluxograma mostra a seqüência dos comandos, bem como as iterações entre eles. As fases correspondentes ao fluxograma são descritas a seguir.

#### **3.3.1.1. Entrada de dados**

Nesta fase, o usuário fornece os dados necessários para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial, correspondentes à declividade, rugosidade e inclinação da parede de montante do canal do terraço ou dreno de superfície; a velocidade de infiltração básica da água no solo; a rugosidade da encosta e imagem de elevação da encosta; e os parâmetros da equação de chuvas intensas. O usuário pode fornecer o nome dos arquivos que contenham a variação espacial da rugosidade da encosta e da VIB ou, se preferir, fornecer valores médios da rugosidade e da VIB para a encosta.

#### **3.3.1.2. Verificação da entrada dos dados**

Uma vez fornecidos os parâmetros, procede-se à verificação da entrada dos dados, ou seja, caso o usuário tenha esquecido de fornecer algum parâmetro, este erro é detectado nesta fase. Uma mensagem de erro é exibida, indicando qual parâmetro não foi fornecido.

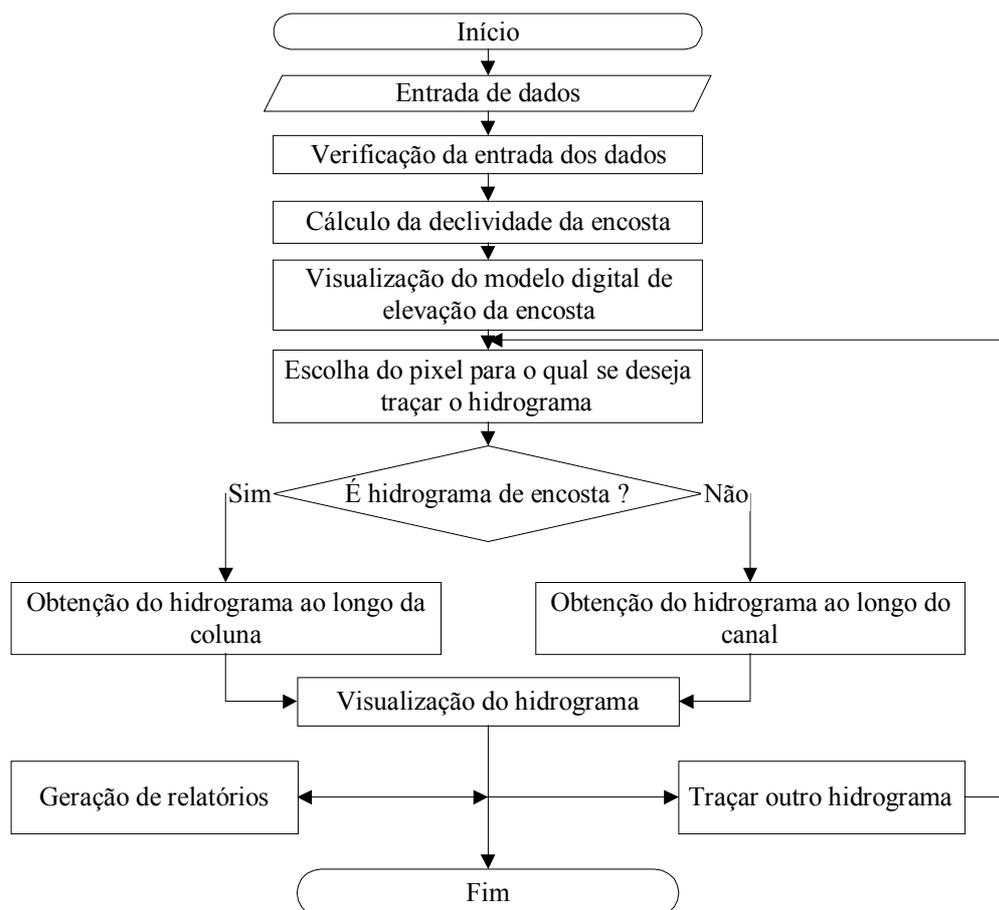


Figura 9 – Fluxograma de funcionamento do software.

### 3.3.1.3. Cálculo da declividade

Partindo-se da premissa de que a encosta possui declividade em um único sentido, o cálculo da declividade é realizado dividindo-se a diferença de nível existente entre duas linhas consecutivas pelo tamanho do pixel no sentido da declividade da encosta. O tamanho do pixel é obtido dividindo-se o comprimento considerado para a encosta pelo número de linhas. Assim, a declividade é obtida pela equação

$$D = \frac{C_i - C_{i+1}}{p} \quad (13)$$

em que

D = declividade do pixel,  $m\ m^{-1}$ ;

$C_i$  = cota da linha i, m;

$C_{i+1}$  = cota da linha i+1, m; e

p = tamanho do pixel na direção da linha de maior declividade do terreno, m.

### 3.3.1.4. Visualização do modelo digital de elevação da encosta

Nesta fase, o software lê, no arquivo que contém o modelo digital de elevação da encosta, os valores dos atributos associados aos pixels. Para cada valor de pixel lido é atribuído um valor correspondente a um índice de cor. O software pinta os pixels de uma tela com a cor correspondente ao índice de cor de cada pixel da imagem. Este procedimento, sendo empregado para todos os pixels da imagem, gera uma tela à semelhança da exibida na Figura 10.

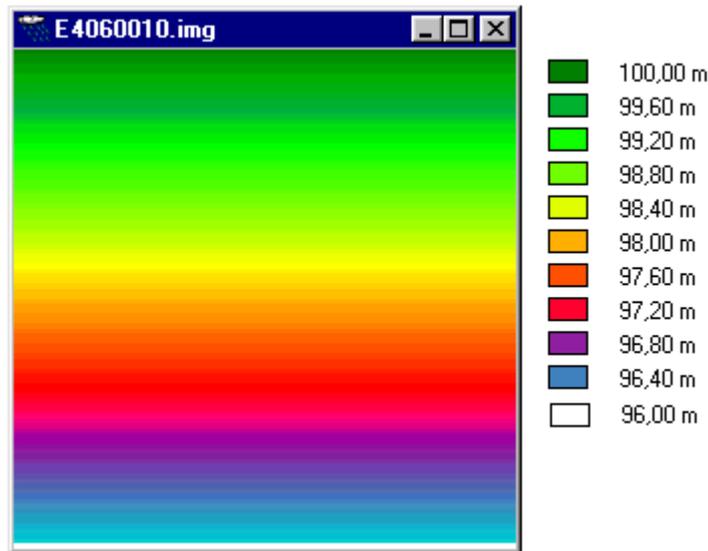


Figura 10 – Representação do modelo digital de elevação da encosta.

### 3.3.1.5. Escolha do pixel de interesse para traçado do hidrograma

Este passo fica a cargo do usuário. Uma vez exibido o modelo digital de elevação da encosta (item anterior), o usuário movimenta o mouse sobre a tela correspondente (Figura 10) e pressiona o botão do mouse no pixel de interesse. No rodapé da tela é fornecido o número da linha e o da coluna correspondente à posição do cursor sobre a figura, os quais o usuário pode utilizar para se orientar na escolha do pixel.

### 3.3.1.6. Tipo de hidrograma

Uma vez selecionado o pixel para o qual se deseja traçar o hidrograma de escoamento superficial, o software identifica se o hidrograma desejado é ao longo da encosta ou no canal do terraço ou dreno de superfície. Se o hidrograma for ao longo da encosta, o procedimento de cálculo é o descrito no item 3.2.1. Caso contrário, o procedimento de cálculo é o descrito no item 3.2.2.

### **3.3.1.7. Visualização do hidrograma**

Após o emprego da metodologia para obtenção do hidrograma, seja ao longo da encosta, seja para seções transversais situadas ao longo do canal, os valores de vazão e tempo obtidos são plotados em uma tela gráfica criada pelo software. Neste momento, pode-se encerrar o programa, gerar um relatório ou traçar outro hidrograma.

### **3.3.2. Estrutura do software**

O programa computacional foi estruturado na forma de módulos, os quais são especificados a seguir.

#### **3.3.2.1. Módulo principal**

Gerencia o funcionamento do software, a inicialização e finalização, visualização de formulários, leitura e gravação de arquivos de dados.

#### **3.3.2.2. Módulo entrada de dados**

Tem por finalidade fornecer os dados necessários para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial, correspondentes aos parâmetros da equação de chuvas intensas, às características do canal (declividade, rugosidade e inclinação da parede de montante do canal do terraço ou dreno de superfície) e da encosta (arquivo contendo o modelo digital de elevação e as informações referentes à rugosidade e VIB do solo) e as características da cobertura vegetal, para determinação das abstrações iniciais. Ao usuário é possibilitado fornecer valores médios de VIB e da rugosidade da encosta ou, então, especificar arquivos que contenham informações sobre a variação espacial destes fatores.

### **3.3.2.2.1 Precipitação**

Permite a obtenção de informações a respeito da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação. As formas para sua obtenção são :

- a partir de um banco de dados em que são apresentadas ao usuário as diversas localidades dos estados brasileiros onde a relação entre intensidade, duração e freqüência da precipitação é conhecida; e
- a partir de mapas que foram obtidos para os Estados de Minas Gerais e Paraná com o uso de um interpolador. Neste caso, cabe ao usuário fornecer a latitude e longitude da localidade de interesse ou identificá-la a partir de um banco de dados em que constam as latitudes e longitudes de sedes de municípios, vilas e distritos.

O usuário pode também fornecer os parâmetros (K, a, b, c) para a localidade em que a equação de chuvas intensas não está disponível.

### **3.3.2.2.2 Rugosidade do terreno**

Permite ao usuário fazer a consulta a um banco de dados que contém informações sobre o valor de rugosidade para diferentes condições de uso e manejo do solo. Os valores que constam do banco de dados são aqueles obtidos de BEASLEY e HUGGINS (1981).

### **3.3.2.2.3 Rugosidade do canal**

Permite ao usuário fazer a consulta a um banco de dados que contém informações sobre o valor de rugosidade para diferentes tipos de canais e condições de operação. Os valores apresentados no banco de dados são os obtidos de CHOW (1986).

### **3.3.2.3. Declividade da parede de montante do canal ( $S_m$ )**

Permite realizar a consulta a um banco de dados em que os valores de  $S_m$  estão associados ao sistema construtivo do canal. Os valores foram obtidos de COMPANHIA... (1994).

### **3.3.2.4. Cobertura vegetal**

Permite a determinação das abstrações iniciais pelo método do número da curva do Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1985). Para tanto, o usuário deve definir o tipo de uso e manejo do solo e a condição hidrológica em que se encontra a área considerada.

### **3.3.2.5. Módulo de visualização do modelo digital de elevação da encosta**

Permite a visualização do modelo digital de elevação da encosta e seleção do pixel de interesse, para traçado do hidrograma. Como ferramentas, possibilita a troca da paleta de cores e efetuar um *zoom*.

### **3.3.2.6. Módulo hidrograma**

Este módulo emprega a metodologia descrita no item 3.2 para obtenção do hidrograma de escoamento superficial. Uma vez obtidos os dados de vazão e tempo, os valores desses parâmetros são plotados em um gráfico.

## **3.4. Análise do comportamento do modelo para diferentes condições do canal e da encosta**

Seguindo-se a metodologia apresentada, procedeu-se à simulação do comportamento do hidrograma de escoamento superficial e da vazão máxima

para diferentes condições do canal e da encosta, para o município de Uberaba-MG.

Para fins de análise do comportamento do modelo, compararam-se os resultados obtidos na simulação com os resultados obtidos para uma condição dita inicial. Como condição inicial, considerou-se uma encosta apresentando as seguintes características:

- Parâmetros da equação de chuvas intensas para Uberaba (PINTO, 1995):
  - $K = 3000$ ;
  - $a = 0,206$ ;
  - $b = 37,459$ ;
  - $c = 0,904$ ; e
  - tempo de retorno = 10 anos.
- Encosta: modelo digital apresentado na Figura 10, possuindo as seguintes características:
  - declividade do terreno ( $S_t$ ) =  $0,10 \text{ m m}^{-1}$ ;
  - espaçamento horizontal (EH) = 40 m;
  - velocidade de infiltração básica da água no solo (VIB) =  $50 \text{ mm h}^{-1}$ ; e
  - coeficiente de rugosidade ( $n_t$ ) =  $0,100, \text{ s m}^{-1/3}$ .
- Canal:
  - declividade do canal ( $S_c$ ) =  $0,001 \text{ m m}^{-1}$ ;
  - comprimento (L) = 600 m;
  - coeficiente de rugosidade ( $n_c$ ) =  $0,027, \text{ s m}^{-1/3}$ ; e
  - declividade da parede de montante ( $S_m$ ) =  $0,667 \text{ m m}^{-1}$ .

As análises foram realizadas considerando-se a variação de um dos fatores, com os demais sendo mantidos constantes e iguais ao nível médio. Para fins de simulação, adotou-se a variação de cada fator, em relação à condição inicial, como sendo as citadas a seguir:

- espaçamentos horizontais: 10, 20, 30 e 40 metros;
- comprimentos do canal: 150, 300, 450 e 600 metros;

- VIBs: 25 e 75 mm h<sup>-1</sup>;
- n<sub>t</sub>: 0,035 e 0,200;
- S<sub>c</sub>: 0,0005 e 0,005 m m<sup>-1</sup>; e
- n<sub>c</sub>: 0,018 e 0,05.

A variação percentual da estimativa da vazão máxima foi calculada em relação ao valor dessa variável no nível inicial dos fatores empregados.

Realizou-se ainda simulação, considerando a variação espacial da rugosidade (Figura 11) e da VIB ao longo da encosta (Figura 12).

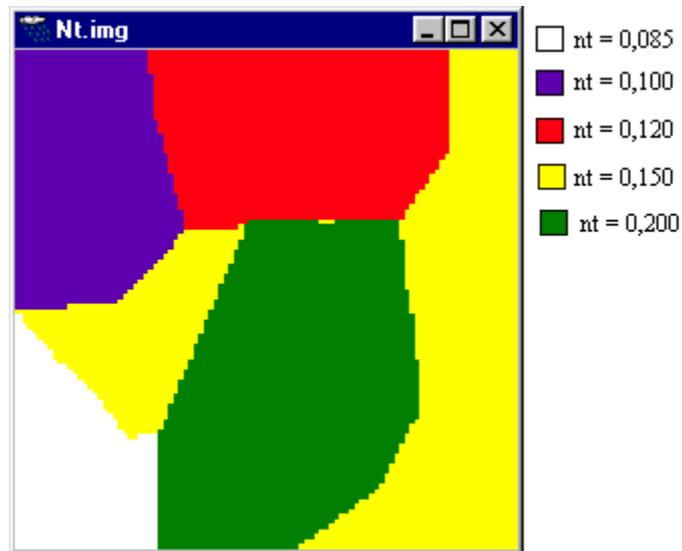


Figura 11 – Representação de imagem relativa à variação espacial da rugosidade ao longo da encosta.

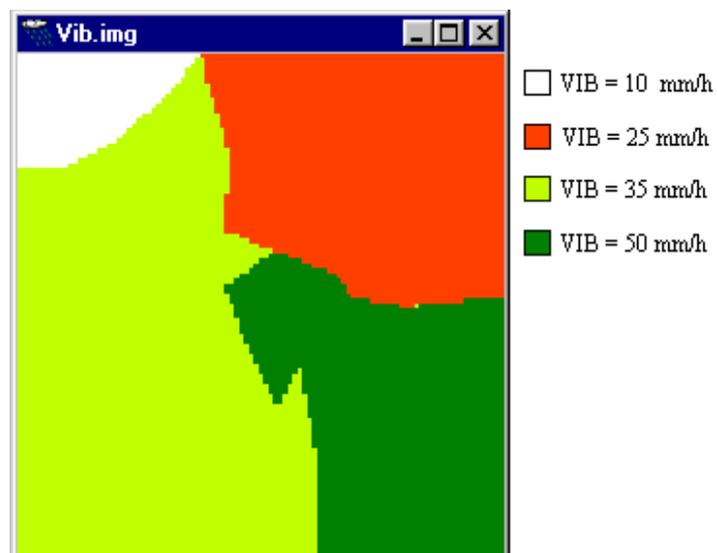


Figura 12 – Representação de imagem relativa à variação espacial da VIB ao longo da encosta.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Software Hidrograma 1.0**

Na Figura 13 está apresentada a tela de apresentação do aplicativo, com os nomes de seus idealizadores, sua finalidade, o número de série e o nome do usuário para o qual a cópia é autorizada. A tela referente à entrada de dados é mostrada na Figura 14. Neste módulo são exigidas informações a respeito da equação de chuvas intensas e das características do canal (rugosidade, declividade e inclinação da parede de montante) e são mostrados o nome do arquivo que contém a imagem de elevação ou o modelo digital de elevação da encosta e os valores de rugosidade do terreno e da VIB, além das informações referentes à cobertura vegetal, necessárias à determinação das abstrações iniciais. Este módulo permite ao usuário trabalhar com valores médios de rugosidade do terreno e da VIB ou considerar a variação espacial destes fatores. Ao marcar a opção “Valor único” referente a cada um destes fatores, o software exigirá a quantificação de um valor médio para o fator considerado. Ao desmarcar a opção, o software exigirá a identificação de um arquivo que contenha as informações sobre a variação espacial da rugosidade do terreno e, ou, da VIB.



Figura 13 – Tela de apresentação do software.

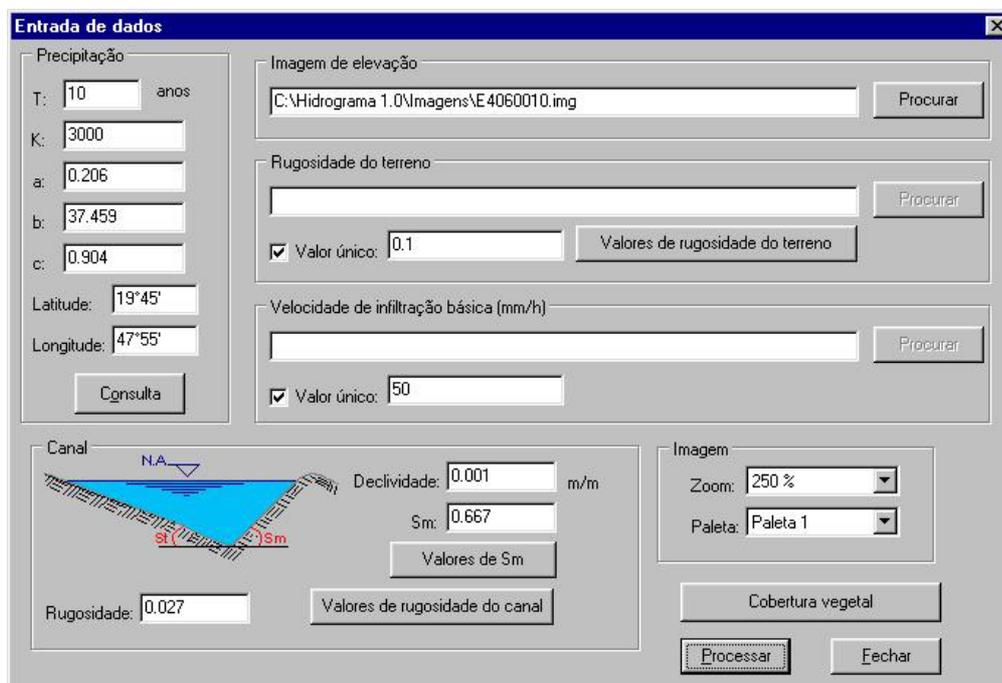


Figura 14 - Tela relativa à entrada de dados.

Na Figura 15 visualiza-se a consulta ao banco de dados, para a determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. Nesse formulário o usuário pode obter os parâmetros citados para qualquer localidade dos Estados de Minas Gerais e do Paraná. Para os outros estados brasileiros existe um banco de dados com os parâmetros relativos às localidades em que a equação de intensidade-duração-frequência da precipitação é conhecida.

A consulta ao banco de dados de valores de rugosidade do terreno é mostrada na Figura 16, evidenciando-se os valores de rugosidade para diferentes tipos de uso e manejo do solo, correspondentes a condições consideradas como níveis mínimo, médio e máximo para este parâmetro. O campo “Valor da rugosidade” será preenchido com o valor correspondente ao nível normal quando o usuário selecionar a condição de superfície do terreno.

Na Figura 17 é apresentada a consulta ao banco de dados de valores de rugosidade do canal, evidenciando-se diversos tipos de acabamento das paredes do canal e os valores correspondentes aos níveis mínimo, médio e máximo para este parâmetro. O campo “Valor da rugosidade” será preenchido com o valor correspondente ao nível normal quando o usuário selecionar a condição de superfície do terreno.

O módulo principal é visualizado na Figura 18, assim como os módulos hidrograma e visualização da imagem de elevação. Como se pode perceber, é possível traçar vários hidrogramas e visualizá-los simultaneamente. Esta potencialidade permite a análise de hidrogramas, seja para o canal, seja para a encosta, ao mesmo tempo. A Figura 19 apresenta uma visão mais detalhada do módulo hidrograma e as opções disponíveis quando se pressiona o botão direito do mouse. Estas opções permitem:

- a) salvar os dados numéricos do hidrograma e os dados de entrada em um arquivo-texto;
- b) salvar o hidrograma como um “bitmap” padrão do Windows;
- c) copiar o hidrograma para a área de transferência do Windows;
- d) imprimir o hidrograma; e
- e) gerar um relatório.

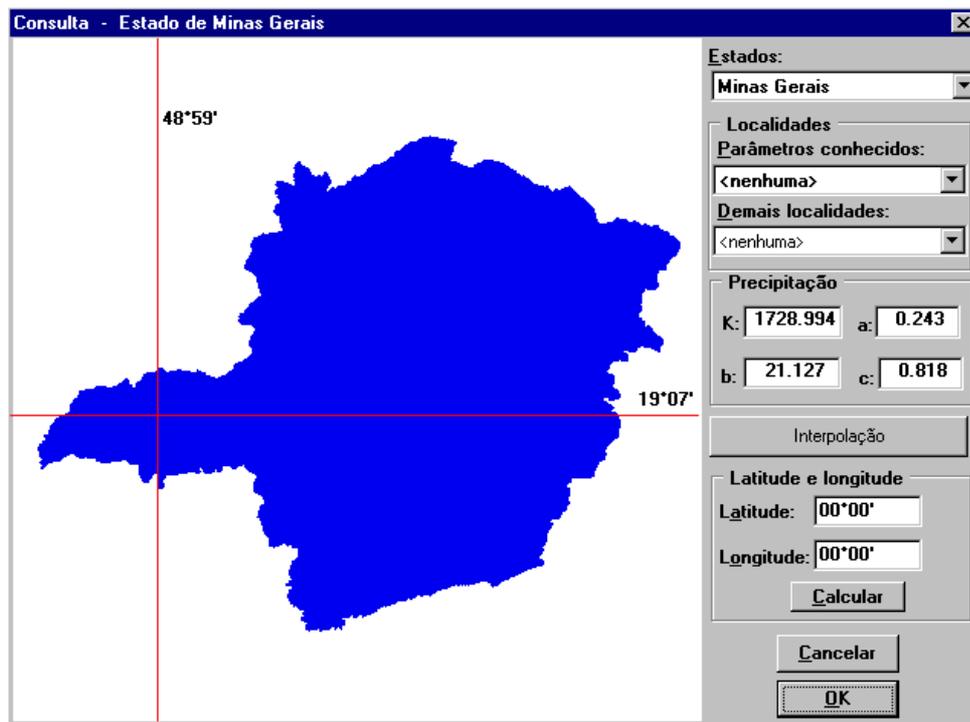


Figura 15 – Tela relativa à obtenção dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação.

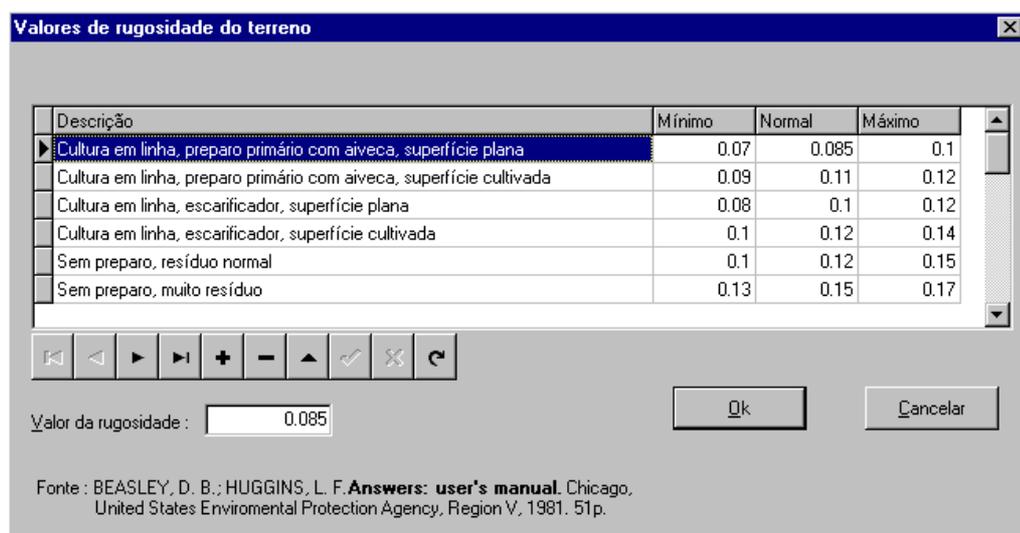


Figura 16 - Tela relativa à consulta ao banco de dados de valores de rugosidade do terreno.

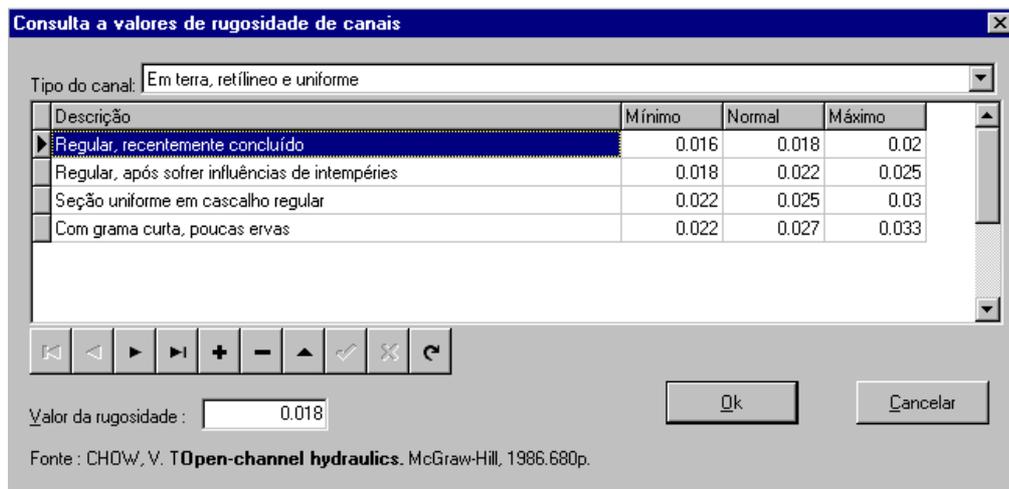


Figura 17 – Tela relativa à consulta ao banco de dados de valores de rugosidade do canal.

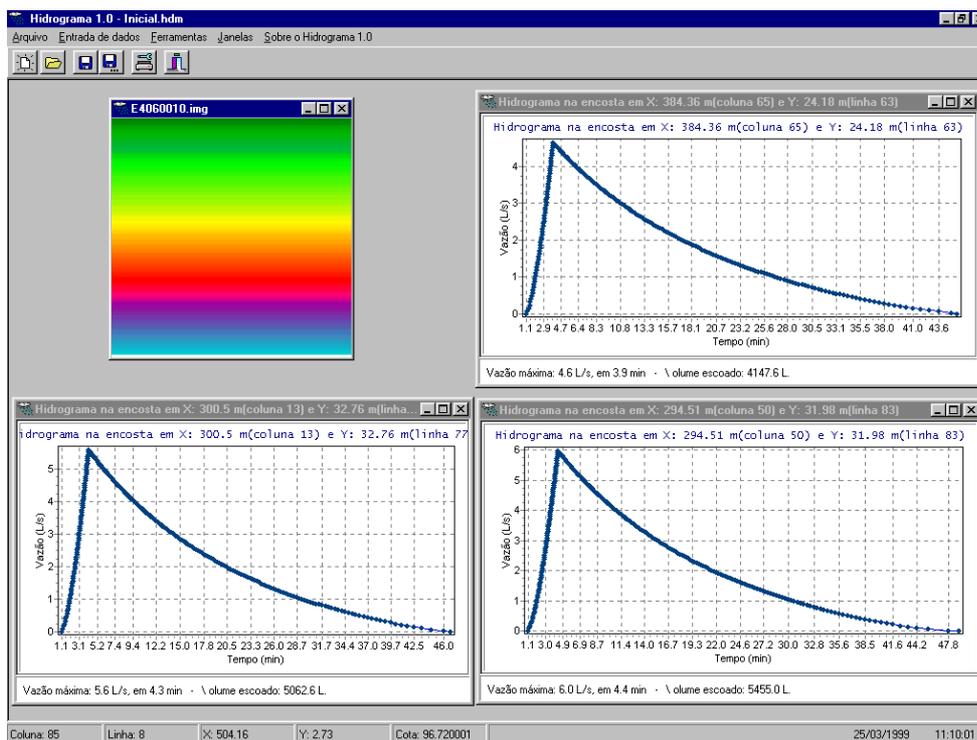


Figura 18 – Tela relativa ao módulo principal, apresentando o modelo digital de elevação do terreno e hidrogramas obtidos tanto para a encosta como para o canal.

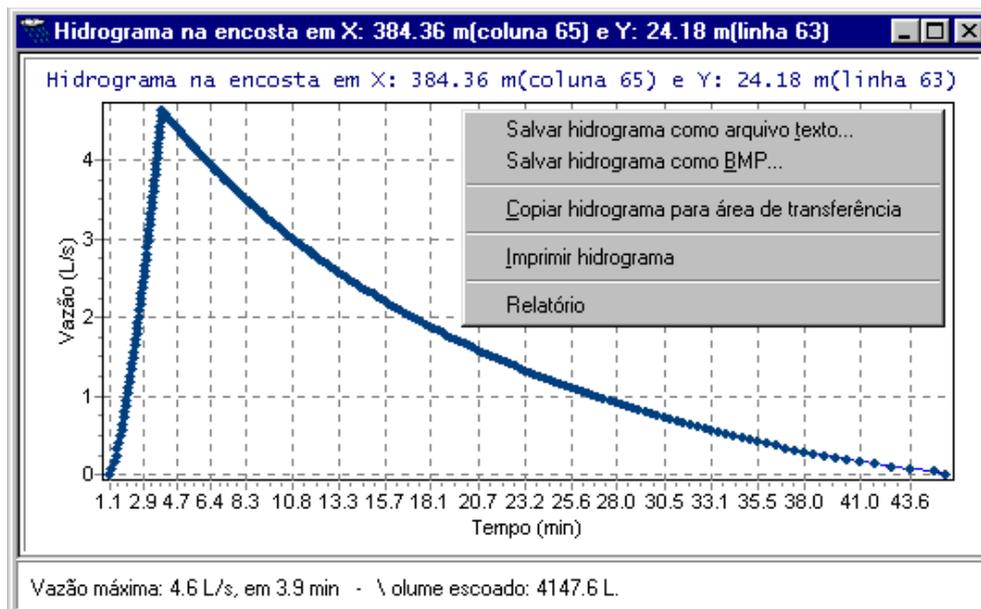


Figura 19 – Tela relativa ao hidrograma de escoamento superficial para um pixel de uma encosta, visualizando-se o valor da vazão máxima, o tempo de ocorrência e as opções relacionadas à manipulação do gráfico.

## 4.2. Hidrogramas de escoamento superficial

Apresentam-se a seguir os hidrogramas de escoamento superficial obtidos com o software Hidrograma 1.0 para os níveis dos fatores correspondentes à condição inicial e para variações nos valores de declividade do canal, rugosidade do canal, velocidade de infiltração básica e rugosidade do terreno.

### 4.2.1. Influência do comprimento do canal e da encosta nos hidrogramas de escoamento superficial

Na Figura 20 estão apresentados os hidrogramas obtidos para diferentes comprimentos de encosta, considerando-se os níveis dos fatores pertinentes à condição inicial ( $S_t = 0,10 \text{ m m}^{-1}$ ;  $L = 600 \text{ m}$ ;  $EH = 40 \text{ m}$ ;  $VIB = 50 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $n_t = 0,1 \text{ s m}^{-1/3}$ ;  $Sc = 0,001 \text{ m m}^{-1}$ ;  $n_c = 0,027 \text{ s m}^{-1/3}$ ; e  $S_m = 0,667 \text{ m m}^{-1}$ ). Nesta figura pode-se observar que o valor da vazão de escoamento superficial é nulo

para todas as células até o tempo  $t_{ia}$ . Após este tempo, a vazão aumentou até que a contribuição advinda da célula localizada na primeira linha atingiu a célula considerada. Após este tempo, a vazão passou a decrescer com o tempo.

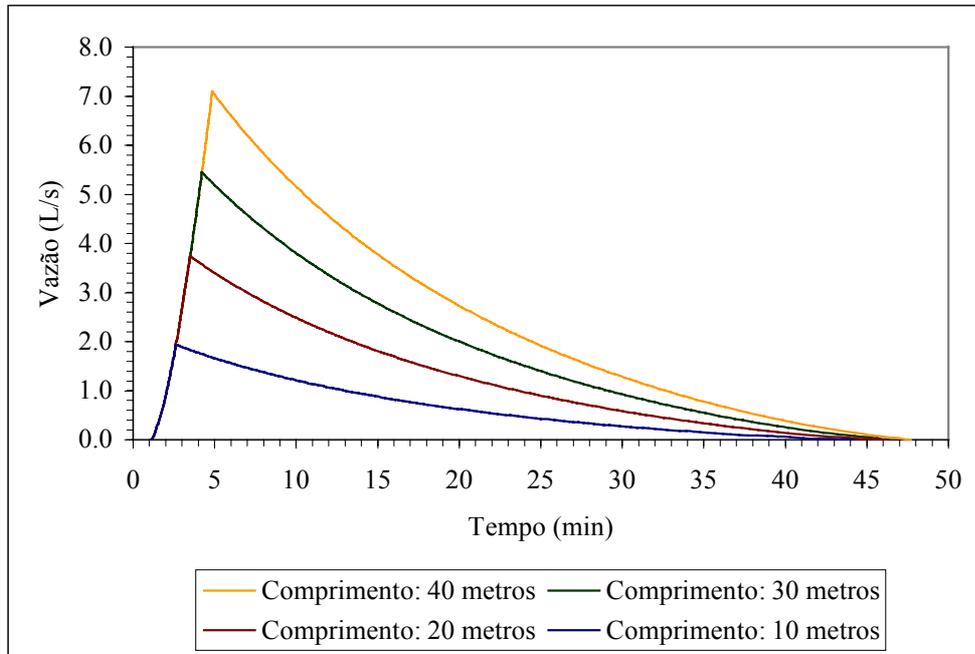


Figura 20 – Hidrogramas referentes a comprimentos de encosta correspondentes a 10, 20, 30 e 40 metros, considerando os níveis médios dos fatores pertinentes à condição inicial ( $S_t = 0,10 \text{ m m}^{-1}$ ;  $VIB = 50 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $n_t = 0,1 \text{ s m}^{-1/3}$ ;  $Sc = 0,001 \text{ m m}^{-1}$ ;  $n_c = 0,027 \text{ s m}^{-1/3}$ ; e  $S_m = 0,667 \text{ m m}^{-1}$ ).

Pela análise da Figura 20, pode-se observar também que, para o comprimento de encosta de 40 metros, relativo à condição inicial, o valor da vazão máxima obtido foi de  $7,1 \text{ L s}^{-1}$ , correspondente a um tempo de 4,9 min. O valor do volume de escoamento superficial obtido pelo software foi de 6558,5 L. A redução do comprimento da encosta provocou a diminuição do valor da vazão máxima, do tempo relativo à sua ocorrência e do volume de escoamento superficial. Dessa forma, observa-se que, para um comprimento de 30 metros (redução de 25% no comprimento), houve redução da vazão de escoamento superficial para  $5,5 \text{ L s}^{-1}$  (redução de 22,5%) e do tempo de ocorrência da vazão

máxima para 4,2 min, e o volume de escoamento superficial obtido pelo software reduziu para 4931,6 L (redução de 24,8%). Já para um comprimento de encosta de 20 metros (redução de 50%), o valor da vazão máxima obtido foi de 3,7 L s<sup>-1</sup> (redução de 47,9%), ocorrendo num tempo igual a 3,5 min. O volume de escoamento superficial reduziu para 3298,0 L (redução de 49,7%). Para um comprimento de encosta de 10 metros (redução de 75%), o valor da vazão máxima obtido foi de 1,9 L s<sup>-1</sup> (redução de 73,2%), correspondendo a um tempo de 2,6 minutos e a um volume de escoamento superficial de 1653,9 L (redução de 74,8%). A tendência de variação aproximadamente linear da vazão de escoamento superficial com o comprimento da encosta pode ser explicada pela elevada declividade do terreno (10%), responsável pela redução do tempo de deslocamento do escoamento superficial ao longo da encosta. Assim, a redução da intensidade de precipitação durante o tempo de ocorrência da concentração do escoamento superficial apresentou pequena variação com a modificação do comprimento da encosta, em função do reduzido tempo necessário para o deslocamento da água ao longo desta.

Na Figura 21 estão apresentados os hidrogramas obtidos para diferentes seções transversais, correspondentes a comprimentos do canal de 150, 300, 450 e 600 metros, considerando-se os níveis dos fatores pertinentes à condição inicial. Pela análise da referida figura, verifica-se que, para um comprimento de canal de 600 metros, correspondente à condição inicial, o valor da vazão máxima foi de 293,7 L s<sup>-1</sup>, correspondendo a um tempo de 34,5 min e a um volume de escoamento superficial de 655853,4 L. Para um comprimento do canal de 450 metros (redução de 25%), o valor da vazão máxima calculada foi de 265,0 L s<sup>-1</sup> (redução de 9,8%), correspondendo a um tempo de 27,8 min. O volume de escoamento superficial reduziu para 491890,1 L (redução de 25%). Para um comprimento de 300 metros (redução de 50%), o valor da vazão máxima de escoamento superficial obtido foi de 214,5 L s<sup>-1</sup> (redução de 27,0%), e do tempo de sua ocorrência, de 20,7 min, sendo o volume de escoamento superficial reduzido para 327926,7 L (redução de 50%). Para um comprimento do canal de 150 metros (redução de 75%), o valor da vazão máxima foi de 132,8 L s<sup>-1</sup>

(redução de 54,8%), correspondendo a um tempo de 13,5 min e a um volume de escoamento superficial de 163963,4 L (redução de 75%).

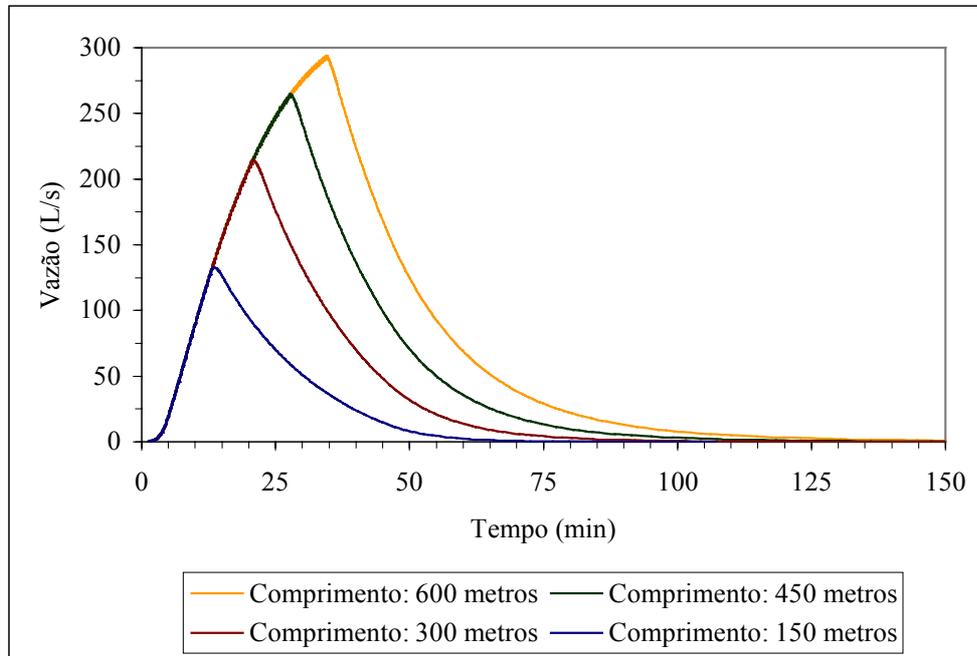


Figura 21 – Hidrogramas de escoamento superficial referentes a seções transversais correspondentes a comprimentos do canal de 150, 300, 450 e 600 metros, considerando os níveis médios dos fatores pertinentes à condição inicial ( $S_t = 0,10 \text{ m m}^{-1}$ ;  $EH = 40 \text{ m}$ ;  $VIB = 50 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $n_t = 0,1 \text{ s m}^{-1/3}$ ;  $Sc = 0,001 \text{ m m}^{-1}$ ;  $n_c = 0,027 \text{ s m}^{-1/3}$ ; e  $S_m = 0,667 \text{ m m}^{-1}$ ).

Portanto, a taxa de variação da vazão é inversamente proporcional ao comprimento do canal, sendo alta para pequenos comprimentos do canal e baixa para comprimentos maiores. Apesar de o aumento no comprimento do canal implicar aumento da área de contribuição, justifica-se o declínio na taxa de variação da vazão de escoamento superficial pelo aumento no tempo de deslocamento da vazão no canal, o qual provoca diminuição no valor da intensidade instantânea de precipitação e, conseqüentemente, diminuição na vazão de contribuição advinda de cada célula da encosta. Assim, quanto maior o comprimento do canal, menor será a intensidade instantânea de precipitação

correspondente à contribuição de cada célula do sistema reticulado no momento em que a vazão gerada no pixel mais remoto atingir a seção considerada. Esta diminuição na intensidade instantânea de precipitação promove a redução na taxa de variação da vazão de escoamento superficial com o aumento do comprimento do canal.

#### **4.2.2. Influência da VIB nos hidrogramas de escoamento superficial**

Na Figura 22 é mostrada a influência da VIB no comportamento da vazão de escoamento superficial para condições de encosta, considerando os níveis dos fatores pertinentes à condição inicial. Observou-se que um aumento na VIB promoveu redução tanto da vazão máxima como do volume de escoamento superficial (área situada sob a curva representativa do hidrograma de escoamento superficial). Assim, para uma VIB de  $50 \text{ mm h}^{-1}$  (condição inicial), o valor da vazão máxima foi de  $7,1 \text{ L s}^{-1}$ , correspondendo a um tempo de 4,9 min e a um volume de escoamento superficial de 6558,5 L. Para uma VIB de  $25 \text{ mm h}^{-1}$  (redução de 50%), o valor da vazão máxima obtido foi de  $9,1 \text{ L s}^{-1}$  (aumento de 28,2%), correspondente a um tempo de 4,0 min, e o volume de escoamento superficial aumentou para 12471,0 L (aumento de 90,2%). Já para uma VIB de  $75 \text{ mm h}^{-1}$  (aumento de 50%), o valor da vazão máxima foi de  $5,3 \text{ L s}^{-1}$  (redução de 25,4%), encontrado num tempo de 5,3 min. O volume de escoamento superficial reduziu para 3493,1 L (redução de 46,7%).

Portanto, embora a VIB tenha expressiva influência no valor do volume e da vazão máxima de escoamento superficial, o seu efeito no tempo correspondente à ocorrência da vazão máxima é pequeno.

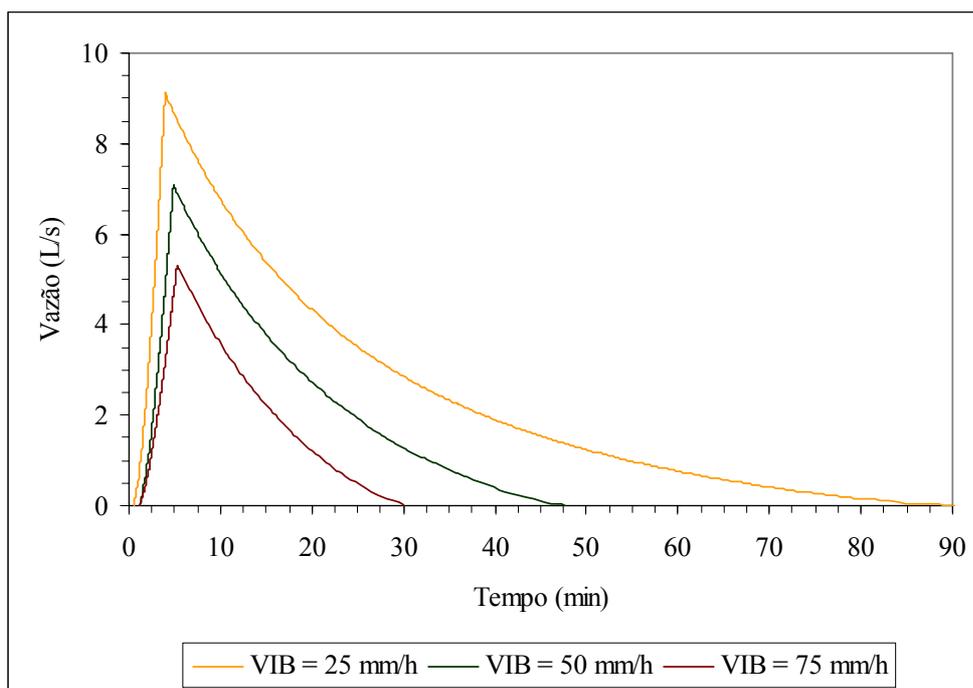


Figura 22 – Hidrogramas de escoamento superficial para condições de encosta, referentes a valores de VIB de 25, 50 e 75 mm h<sup>-1</sup>, considerando os níveis médios dos fatores pertinentes à condição inicial ( $S_t = 0,10 \text{ m m}^{-1}$ ;  $L = 600 \text{ m}$ ;  $E_H = 40 \text{ m}$ ;  $n_t = 0,1 \text{ s m}^{-1/3}$ ;  $S_c = 0,001 \text{ m m}^{-1}$ ;  $n_c = 0,027 \text{ s m}^{-1/3}$ ; e  $S_m = 0,667 \text{ m m}^{-1}$ ).

Na Figura 23 é mostrado o efeito da VIB no comportamento da vazão de escoamento superficial ao longo do canal, considerando os níveis dos fatores pertinentes à condição inicial. Para uma VIB de 50 mm h<sup>-1</sup>, o valor da vazão máxima foi de 293,7 L s<sup>-1</sup>, correspondendo a um tempo de 34,5 min e a um volume de escoamento superficial de 655853,4 L. Para uma VIB de 25 mm h<sup>-1</sup> (redução de 50%), o valor da vazão máxima foi de 487,8 L s<sup>-1</sup> (aumento de 66,1%), ocorrida num tempo de 31,1 min, e o volume de escoamento superficial aumentou para 1247096,5 L (aumento de 90,1%). Já para uma VIB de 75 mm h<sup>-1</sup> (aumento de 50%), o valor da vazão máxima foi de 134,3 L s<sup>-1</sup> (redução de 54,3%), correspondendo a um tempo de 29,4 min. O volume de escoamento superficial reduziu para 349314,3 L (redução de 46,7%).

Na Figura 23 visualiza-se o trecho em que a vazão mantém-se constante ao longo do tempo, caracterizando condições de regime permanente, o que pode ser explicado pelos seguintes aspectos:

- a vazão máxima para as condições consideradas é gerada numa área cujo comprimento é menor que 600 metros;
- no momento em que ocorre a vazão máxima, a intensidade instantânea de precipitação iguala-se à VIB. A partir deste instante, a vazão correspondente a uma seção do canal deve-se somente à contribuição advinda da seção anterior (equação 10), sendo, portanto, a contribuição advinda da encosta nula; e
- a vazão mantém-se constante até que a contribuição relativa ao comprimento de 600 metros atinja a seção de deságüe, após o que a vazão decresce com o tempo.

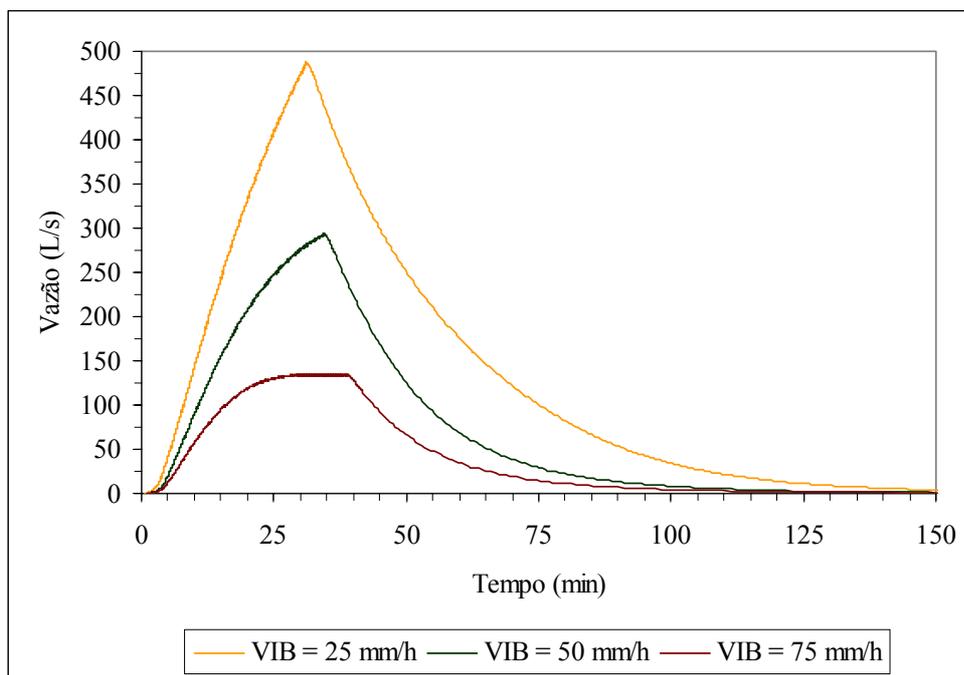


Figura 23 – Hidrogramas de escoamento superficial para o canal, referentes a valores de VIB de 25, 50 e 75mm h<sup>-1</sup>, considerando os níveis médios dos fatores pertinentes à condição inicial ( $S_t = 0,10 \text{ m m}^{-1}$ ;  $L = 600 \text{ m}$ ;  $EH = 40 \text{ m}$ ;  $n_t = 0,1 \text{ s m}^{-1/3}$ ;  $Sc = 0,001 \text{ m m}^{-1}$ ;  $n_c = 0,027 \text{ s m}^{-1/3}$ ; e  $S_m = 0,667 \text{ m m}^{-1}$ ).

### **4.2.3. Influência da rugosidade do terreno no hidrograma de escoamento superficial ao longo da encosta**

Na Figura 24 apresenta-se o efeito da rugosidade do terreno no comportamento da vazão de escoamento superficial para condições de encosta, considerando os níveis dos fatores pertinentes à condição inicial. Pela análise desta figura, pode-se observar que o aumento da rugosidade do terreno provoca diminuição no valor da vazão máxima e aumento no seu tempo de ocorrência. 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 pela diminuição no tempo de oportunidade para ocorrência da infiltração, devido à respectiva diminuição ou ao aumento da rugosidade do terreno, que atua na velocidade do escoamento superficial.

Analisando a Figura 24, verifica-se que, para um valor da rugosidade do terreno de 0,10, o valor da vazão máxima foi de  $7,1 \text{ L s}^{-1}$ , ocorrendo num tempo de 4,9 min, correspondendo a um volume de escoamento superficial de 6558,5 L. Para um valor de rugosidade do terreno de 0,035 (redução de 65%), o valor da vazão máxima foi de  $7,6 \text{ L s}^{-1}$  (aumento de 7%), correspondendo a um tempo de 3,1 min e a um volume de escoamento superficial de 6569,0 L (aumento de 0,16%). Já para uma rugosidade do terreno de 0,20 (aumento de 100%), o valor da vazão máxima foi de  $6,6 \text{ L s}^{-1}$  (redução de 7%), correspondendo a um tempo de 6,9 min. O volume de escoamento superficial reduziu para 6535,7 L (redução de 0,35%).

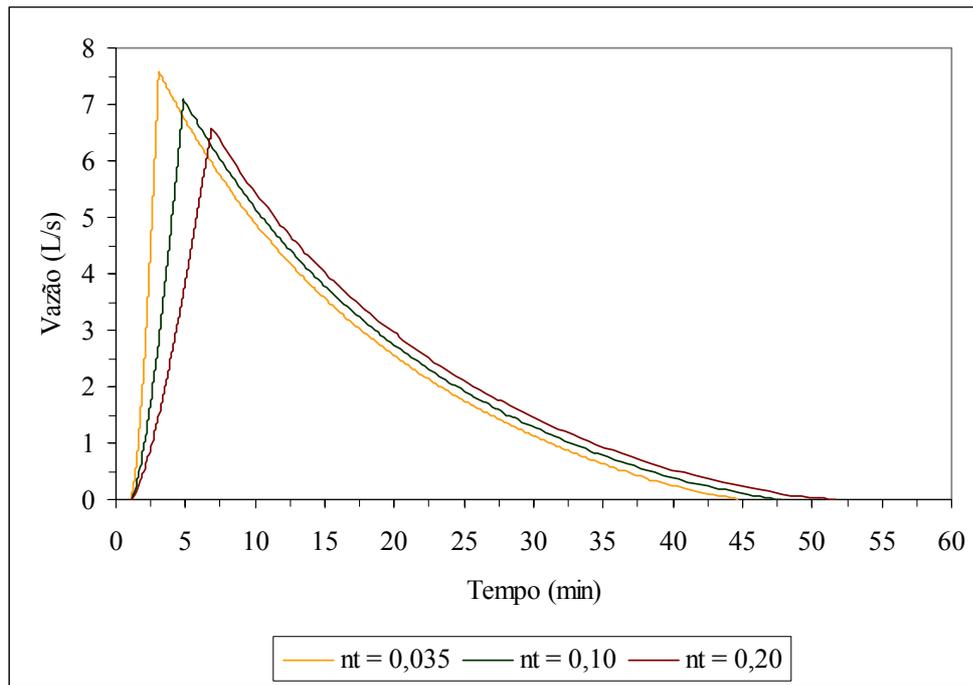


Figura 24 – Hidrogramas de escoamento superficial para condições de encosta, referentes a rugosidades do terreno de 0,035, 0,10 e 0,20  $s\ m^{-1/3}$ , considerando os níveis médios dos fatores pertinentes à condição inicial ( $S_t = 0,10\ m\ m^{-1}$ ;  $L = 600\ m$ ;  $EH = 40\ m$ ;  $VIB = 50\ mm\ h^{-1}$ ;  $Sc = 0,001\ m\ m^{-1}$ ;  $n_c = 0,027\ s\ m^{-1/3}$ ; e  $S_m = 0,667\ m\ m^{-1}$ ).

#### 4.2.4. Análise da influência da declividade do canal na vazão do escoamento superficial

Na Figura 25 apresenta-se o efeito da declividade do canal no comportamento da vazão de escoamento superficial para condições do canal, considerando os níveis dos fatores pertinentes à condição inicial. Nesta figura, verifica-se que a vazão máxima cresce com o aumento da declividade do canal, observando-se que, para um valor de declividade do canal de  $0,001\ m\ m^{-1}$ , o valor da vazão máxima foi de  $293,7\ L\ s^{-1}$ , ocorrendo num tempo de 34,5 min, correspondendo a um volume de escoamento superficial de 655853,4 L. Para uma declividade do canal de  $0,0005\ m\ m^{-1}$  (redução na declividade de 50%), o valor da vazão máxima foi de  $219,9\ L\ s^{-1}$  (redução de 25,1%), ocorrendo num tempo de 45,4 min. Já para uma declividade de  $0,005\ m\ m^{-1}$  (aumento na

declividade de 400%), o valor da vazão máxima foi de  $446,9 \text{ L s}^{-1}$  (aumento de 52,1%), ocorrendo num tempo de 19,5 min.

As alterações promovidas na declividade do canal não tiveram efeito no volume de escoamento superficial. Na Figura 25, observou-se que, similarmente ao comportamento evidenciado na Figura 23, o escoamento superficial que ocorre no canal, referente à declividade de  $0,0005 \text{ m m}^{-1}$ , atinge condições de regime permanente durante um determinado intervalo de tempo, sendo a explicação para este comportamento a mesma apresentada no item 4.2.2.

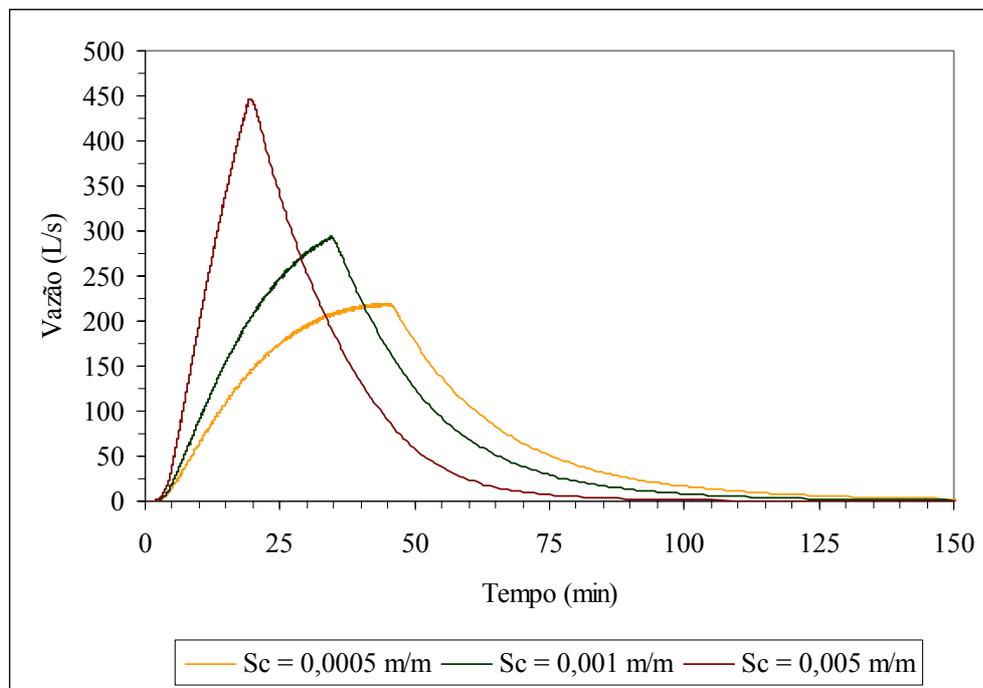


Figura 25 – Hidrogramas de escoamento superficial para o canal, referentes a declividades do canal de  $0,0005$ ,  $0,001$  e  $0,005 \text{ m m}^{-1}$ , considerando os níveis médios dos fatores pertinentes à condição inicial ( $S_t = 0,10 \text{ m m}^{-1}$ ;  $L = 600 \text{ m}$ ;  $EH = 40 \text{ m}$ ;  $n_t = 0,10 \text{ s m}^{-1/3}$ ;  $VIB = 50 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $n_c = 0,027 \text{ s m}^{-1/3}$ ; e  $S_m = 0,667 \text{ m m}^{-1}$ ).

#### **4.2.5. Análise da influência da rugosidade do canal na vazão do escoamento superficial**

Na Figura 26, apresenta-se o efeito da rugosidade do canal no comportamento da vazão de escoamento superficial para condições do canal, considerando os níveis dos fatores pertinentes à condição inicial. Nesta figura pode-se observar que um aumento no valor da rugosidade do canal proporcionou uma diminuição da vazão máxima de escoamento superficial, em decorrência do retardamento que ocorre no seu tempo de ocorrência. Para um valor de rugosidade do canal de 0,027, o valor da vazão máxima foi de  $293,7 \text{ s}^{-1}$ , correspondendo a um tempo de 34,5 min, sendo o volume de escoamento superficial igual a 655853,4 L. Para um valor de rugosidade do canal de 0,018 (redução de 33,3%), o valor da vazão máxima foi de  $375,9 \text{ L s}^{-1}$  (aumento de 28%), ocorrendo num tempo de 25,5 min. Já para uma rugosidade do canal de 0,05 (aumento de 85,2%), o valor da vazão máxima foi de  $168,2 \text{ L s}^{-1}$  (redução de 42,7%), correspondendo a um tempo de 45 min. A redução que a rugosidade promoveu na vazão de escoamento superficial não acarretou, entretanto, mudança no volume de escoamento superficial produzido.

O volume de escoamento superficial não foi afetado pelas variações realizadas na rugosidade do canal. Observa-se, na Figura 26, um comportamento similar ao evidenciado na Figura 23, na qual o escoamento superficial que ocorre no canal, referente à rugosidade de  $0,05 \text{ s m}^{-3}$ , atinge condições de regime permanente durante um determinado intervalo de tempo, sendo a explicação para este comportamento a mesma apresentada no item 4.2.2.

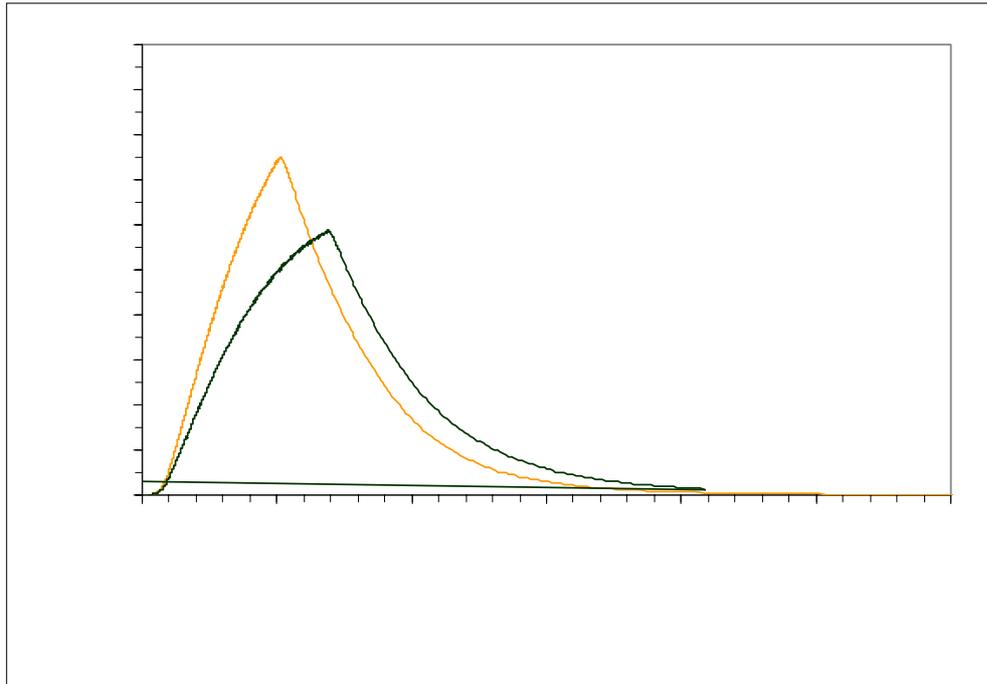


Figura 26 – Hidrogramas de escoamento superficial para o canal, referentes a rugosidades do canal de 0,018, 0,027 e 0,05  $s\ m^{-1/3}$ , considerando os níveis médios dos fatores pertinentes à condição inicial ( $S_t = 0,10\ m\ m^{-1}$ ;  $L = 600\ m$ ;  $EH = 40\ m$ ;  $n_t = 0,10\ s\ m^{-1/3}$ ;  $VIB = 50\ mm\ h^{-1}$ ;  $Sc = 0,001\ m\ m^{-1}$ ; e  $S_m = 0,667\ m\ m^{-1}$ ).

#### 4.2.6. Hidrograma de escoamento superficial levando em consideração a variação espacial da rugosidade da encosta e da VIB

Na Figura 27 visualiza-se o hidrograma de escoamento superficial para a encosta e, na Figura 28, o hidrograma de escoamento superficial para o canal, ambas considerando-se a variação espacial da rugosidade e da VIB. Uma análise destas figuras demonstra a importância de ter modelos hidrológicos que contemplem a variação espacial das características físicas da área analisada, tarefa esta possível com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas.

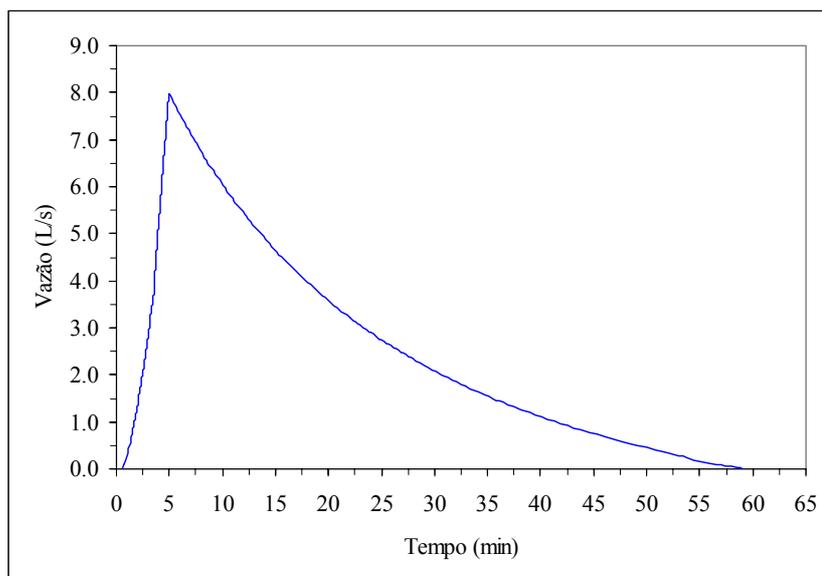


Figura 27 – Hidrograma de escoamento superficial obtido para a encosta, considerando a variação espacial da rugosidade e da VIB do terreno e os níveis dos fatores pertinentes à condição inicial ( $S_t = 0,10 \text{ m m}^{-1}$ ;  $L = 600 \text{ m}$ ;  $EH = 40 \text{ m}$ ;  $Sc = 0,001 \text{ m m}^{-1}$ ; e  $S_m = 0,667 \text{ m m}^{-1}$ ).

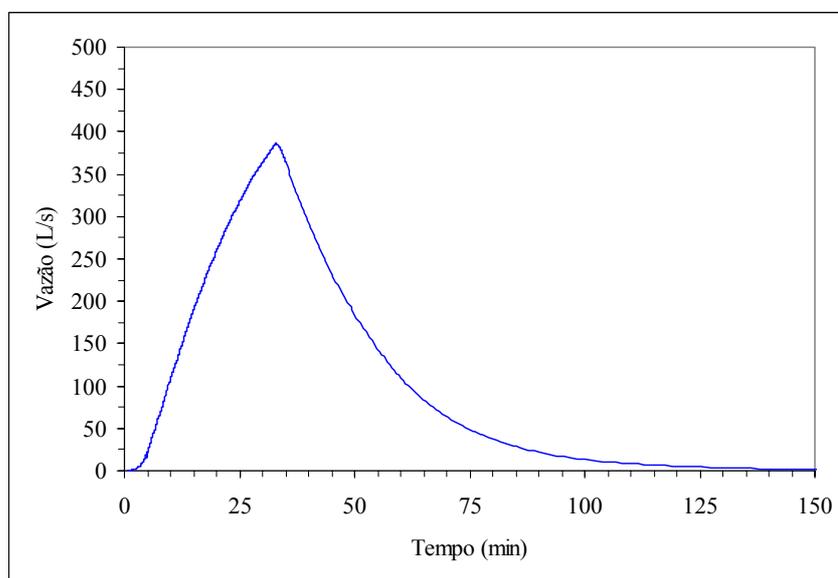


Figura 28 – Hidrograma de escoamento superficial obtido para o canal, considerando a variação espacial da rugosidade e da VIB do terreno e os níveis dos fatores pertinentes à condição inicial ( $S_t = 0,10 \text{ m m}^{-1}$ ;  $L = 600 \text{ m}$ ;  $EH = 40 \text{ m}$ ;  $Sc = 0,001 \text{ m m}^{-1}$ ; e  $S_m = 0,667 \text{ m m}^{-1}$ ).

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Desenvolveu-se uma metodologia que permite obter o hidrograma de escoamento superficial e a vazão máxima para qualquer posição ao longo de uma encosta, 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.

Foram utilizados o Sistema de Informações Geográficas Idrisi for Windows 1.0 para gerar as imagens da encosta e um banco de dados relativo à rugosidade do terreno e à velocidade de infiltração básica da água no solo.

Para obter o hidrograma de escoamento superficial, a área da encosta foi subdividida em um sistema reticulado, composto por 100 linhas e 100 colunas, com a análise sendo realizada para duas situações: na encosta e no canal. Até o tempo de preenchimento das abstrações iniciais, o escoamento superficial foi nulo. Para a encosta, foi considerado que a vazão ocorre exclusivamente na direção da declividade desta e aumenta até quando a contribuição advinda da linha 1 alcança a linha considerada. Após este período, a vazão diminui com o tempo. A vazão de cada pixel foi obtida somando-se a vazão produzida no pixel considerado e a vazão produzida nos pixels que contribuem com escoamento superficial para o pixel em análise. A vazão no canal foi obtida pela soma das vazões das colunas do sistema reticulado. Para facilitar a aplicação da

metodologia desenvolvida, elaborou-se um software em linguagem de programação Delphi.

Com o intuito de verificar a utilização da metodologia e do software obtidos, procedeu-se a uma série de simulações em uma área hipotética de largura igual a 40 metros, comprimento de 600 metros e declividade de 10%.

A metodologia desenvolvida permitiu a determinação do hidrograma de escoamento superficial ao longo da encosta e também para seções transversais localizadas ao longo do canal. Além disso, proporcionou a quantificação da vazão máxima de escoamento superficial, que é essencial para projetar a seção transversal de canais, e do volume escoado superficialmente. O uso dos hidrogramas obtidos permitirá, quando associados com o valor crítico de resistência ao cisalhamento do solo, a estimativa de perdas de solo que acontecem como consequência do processo erosivo.

Embora a metodologia desenvolvida não tenha sido testada em condições reais, os resultados obtidos nas simulações mostraram boa aproximação com o comportamento físico observado normalmente em condições de campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇÃO AMBIENTAL. v.1, n.0, 1998.

BARROSO, D.G., SILVA, M.L.N. Poluição e conservação dos recursos naturais: solo e água. **Informe Agropecuário**, v.176, n.16, p.17-24, 1992.

BEASLEY, D. B., HUGGINS, L. F. **Answers: user's manual**. Chicago: United States Environmental Protection Agency, Region V, 1981. 51p.

BELTRAN, J.M., SANCHEZ, I.G., FRUK, M.P. Drenaje agrícola. In: CURSO INTERNACIONAL DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE IRRIGAÇÃO, 2, 1988, Brasília, DF. **II Curso...** Brasília, DF:PRONI, 1988.

BINGNER, R.L., GARBRECHT, J., ARNOLD, J.G., SRINIVASAN, R. Effect of watershed subdivision on simulation runoff and finite sediment yield. **Transactions of the ASAE**, v.40, n.5, p.1329-1335, 1997.

BONTA, J.V., RAO, A.R. Estimating peak flows small agricultural watersheds. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.118, n.1, p.122-137, 1992.

CALIJURI, M.L., MEIRA, A.D., PRUSKI, F.F. Geoprocessamento aplicado aos recursos hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p.167-225

- CANTÙ, M. **Dominando o Delphi 3 – a bíblia**. São Paulo: Makron Books, 1997. 1090p.
- CASTRO FILHO, C., BISCAIA, R.C.M. Estudos de conservação do solo em bacias hidrográficas. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3, 1981. Recife. **Anais...** Recife: SBCS, 1981. p.377-402.
- CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1986.680p.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA DE SÃO PAULO – CODASP. **Manual técnico de motomecanização agrícola**. São Paulo: 1994. 101p.
- COSTA, L.M., MATOS, A.T. Impactos da erosão do solo em recursos hídricos. In: SILVA, D.D., PRUSKI, F.F. **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Brasília: MMA/SRH/ABEAS, 1997. p.173-189.
- DAKER, A. **A água na agricultura: manual de hidráulica agrícola**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos. 1970. v.2, 379p.
- EASTMAN, J.R. **Idrisi for Windows - user's guide. version 1.0**. Worcester, MA: Clark University,. 1995. Paginação irregular.
- FENDRICH, R. Tópicos de hidrologia e hidráulica em obras hidráulicas de combate à erosão urbana. In: FENDRICH, R., OBLADEN, N.L., AISSE, M.M., GARCIAS, C.M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. Curitiba: Editora Universitária Champagnat, 1991.p.119-181
- GOLDENFUM, J.A., TUCCI, C.E.M. **Hidrologia de águas superficiais**. Brasília, DF:ABEAS. 1998. 122p. (Curso por tutoria a distância. Gestão de Recursos Hídricos para o Desenvolvimento de Projetos Superficiais. Módulo 3).
- GRAY, D.M. **Handbook on the principles of hydrology**. Nova York: Water Information Center, 1973. 590p.
- GREGORY, J.M. Time of concentration determination for small watersheds. **Transactions of the ASAE**, v.25, n.3, p.686-688, 1982.

- LAL, R. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. **Soil erosion – research methods**. 2.ed. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society, 1994. p.1-9.
- LINDLEY, M.R., BARFIELD, B.J., ASCOUGH II, J.C., WILSON, B.N., STEVENS. E.W. The surface impoundment element for WEPP. **Transactions of the ASAE**, v.41, n.3, p.555-564, 1998.
- MA, Q.L., WAUCHOPE, R.D. HOOK, J.E., JOHNSON, A.W., TRUMAN, C.C., DOWLER, C.C., GASCHO, G.J., DAVIS, J.G., SUMNER, H.R., CHANDLER, L.D. GLEAMS, Opus, and PRZM-2 model predicted versus measured runoff from a coastal plain loamy sand. **Transactions of the ASAE**, v.41, n.1, p.77-88, 1998.
- McMILLAN, W.D., BURG, R.H. Interception loss from grass. **Journal of Geophysical Research**, v.65, n.8, p.2389-2394, 1960.
- MAHESHWARI, B.L., McMAHON, T.A. Modelind shallow overland flow in surface irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.118, n.2, p.201-217, 1982.
- MENDES, C.A.B. **Planejamento nacional de recursos hídricos baseado no uso de técnicas de geoprocessamento**. Porto Alegre: [s.n.], [1997]. 9p. (e-mail: mendes@ifl.if.ufrgs.br).(<http://www.iica.org.br/AguaTrab/Carlos%20andre%20bulhoes/P1TB08.htm>).
- MILLAR, A.A. **Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas**. São Paulo: Editerra Editorial, 1988. 306p.
- PATHAK, P., LARYEA, K.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.
- PINTO, F. A. **Chuvas intensas no Estado de Minas Gerais: análises e modelos**. Viçosa, MG: UFV, 1995. 87p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- PRUSKI, F.F. Aplicação de modelos físico-matemáticos para a conservação de água e solo. In: SILVA, D.D., PRUSKI, F.F. **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Brasília: MMA/SRH/ABEAS, 1997. p.129-171.

- PRUSKI, F.F., FERREIRA, P.A., RAMOS, M.M., CECON, P.R. Model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.123, n.1, p.8-12, 1997.
- PRUSKI, F.F., SILVA, D.D. **Escoamento superficial**. Viçosa, MG:DEA, UFV, 1997. 33p. (caderno didático, 26)
- RAWLS, W.J., ONSTAD, C.A., RICHARDSON, H.H. Residue and tillage effects on SCS runoff curve numbers. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.2, p.357-361, 1980.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L. Comparison between Green-Ampt and curve number runoff predictions. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.6, p.1597-1599, 1986.
- ROJAS, R.M. **Drenaje superficial de tierras agrícolas**. Mérida: [s.n.], 1984. 96p. (Apostila).
- SCHWAB, G.O., FREVERT, R.K., EDMINSTER, T.W., BARNES, K.K. **Soil and water conservation engineering**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1966. 683p.
- SHERIDAM, J.M. Rainfall-streamflow relations for coastal plain watersheds. **Applied Engineering in Agriculture**, v.13, n.3, p.333-344, 1997.
- SILVEIRA, A.L., LOUZADA, J.A., BELTRAME, L.F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. Da Universidade, 1993. p.335-372. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 4).
- SIMANTON, J.R., HAWKINS, R.H., MOSHANI-SARAVI, M., RENARD, K.G. Runoff curve number variation with drainage area, Walnut Gulch, Arizona. **Transactions of the ASAE**, v.39, n.4, p.1391-1394, 1996.
- SMEDEMA, L.K., RYCROFT, D.W. **Land drainage: planning and design of agricultural drainage systems**. New York: Cornell University Press, 1983.376p.
- USDA-SCS. **National engineering handbook**. Washington, D.C. 1985. Section 4.

- VAN DE LEUR, D.A.K. Relaciones de lluvia-escoamento y modelos de calculo. Wagenigen, 1983. Vol. 2. n.p. (Publicacione, 16) In: Principios y aplicaciones del drenaje. Wagenigen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1978. v.2., p.261-342.
- WELLS, L.G., WARD, A.D., MOORE, I.D., PHILLIPS, R.E. Comparison of four infiltration models in characterizing infiltration through surface mine profiles. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.3, p.785-793, 1986.
- YU, B., CAKURS, U., ROSE, C.W. An assessment of methods for estimating runoff rates at the plot scale. **Transactions of the ASAE**, v.41, n.3, p.653-661, 1998.
- ZHANG, X.C., MILLER, W.P., NEARING, M.A., NORTON, L.D. Effects of surface treatment on surface sealing, runoff and interrill erosion. **Transactions of the ASAE**, v.41, n.4, p.989-994, 1998.
- ZOLLWEG, J.A., GBUREK, W.J., STEENHUIS, T.S. SMORMOD - A GIS-integrated rainfall-runoff model. **Transactions of the ASAE**, v.39, n.4, p.1299-1308, 1996.